

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## FAKULTA STROJNÍ

Studijní program M 2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie  
Zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

**Vliv teploty na mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů pro  
příslušenství stavebních a demoličních strojů**

**Effect of temperature on the mechanical properties of structural  
materials for building and demolition machines**

Aleš Emmerling  
**KSP – TP**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. - TU v Liberci

Konzultant diplomové práce: Ing. Pavel Doubek, Ph.D. – TU v Liberci

### **Rozsah práce a příloh:**

|                      |      |
|----------------------|------|
| Počet stran:         | 71   |
| Počet obrázků:       | 50   |
| Počet tabulek:       | 16   |
| Počet příloh:        | 26   |
| Počet jiných příloh: | 1 CD |

**Datum:** 25. května 2012



# **ANOTACE**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**

**Katedra strojírenské technologie**

**Oddělení tváření kovů a plastů**

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství

Student: Aleš Emmerling

Téma práce: Vliv teploty na mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů  
pro příslušenství stavebních a demoličních strojů

Effect of temperature on the mechanical properties of structural  
materials for building and demolition machines

Číslo DP: KSP – TP

Vedoucí DP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. - TU v Liberci

Konzultant DP: Ing. Pavel Doubek, Ph.D. – TU v Liberci

## **Abstrakt:**

Tématem diplomové práce bylo určení vlivu teploty na mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů. Pro vybrané materiály S355J2, S690 QL a Dillidur 400 V byla provedena experimentální měření mechanických hodnot za různých teplot. Pomocí naměřených hodnot bylo vyhodnoceno chování materiálů a výsledky použity pro výpočet v prostředí MKP.

## **Abstract:**

The diploma thesis was to determine the effect of temperature on the mechanical properties of structural materials. For selected materials, S355J2, S690 QL and Dillidur 400 V were performed experimental measurements mechanical properties at different temperatures. According to the measured values were evaluated behavior of materials and results use to calculate a FEM.

### **Místopřísežné prohlášení**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 25. května 2012

.....  
Aleš Emmerling  
Ohrazenice 199  
511 01 Turnov

## **Poděkování**

Úvodem bych chtěl poděkovat zejména vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Pavlu Solfronkovi Ph.D. a konzultantovi Ing. Pavlu Doubkovi, Ph. D. Dále bych rád poděkoval vedení firmy TRIGA-MF za umožnění a podporu mého studia při zaměstnání. Velké poděkování patří také mým pracovním kolegům, zvláště Ing. Michalovi Petřů, za jejich pomoc a shovívavost.

V neposlední řadě patří velké poděkování mým rodičům, za jejich podporu při studiu nejen na Technické univerzitě v Liberci. Dále chci poděkovat všem rodinným příslušníkům, přítelkyni, kamarádům, známým a všem, kteří měli pozitivní vliv na mé studium.

## Obsah

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Seznam použitých symbolů .....</b>                                     | <b>8</b>  |
| <b>1 Úvod .....</b>                                                       | <b>10</b> |
| 1.1 Firma Triga – MF spol. s r.o. ....                                    | 11        |
| <b>2 Teoretická část .....</b>                                            | <b>14</b> |
| 2.1 Deformační chování materiálů .....                                    | 14        |
| 2.1.1 Krystalografická struktura kovů a její poruchy .....                | 14        |
| 2.1.2 Elastická deformace .....                                           | 15        |
| 2.1.3 Plastická deformace .....                                           | 16        |
| 2.2 Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení .....                 | 17        |
| 2.2.1 Zkouška tahem .....                                                 | 19        |
| 2.2.1.1 Mechanické vlastnosti .....                                       | 20        |
| 2.2.2 Zkoušky tvrdosti .....                                              | 23        |
| 2.2.3 Zkouška rázem .....                                                 | 26        |
| 2.3 Válcování .....                                                       | 29        |
| 2.3.1 Pracovní válce a válcovací tratě .....                              | 30        |
| 2.3.2 Válcování plechů .....                                              | 31        |
| 2.4 Simulace v prostředí MKP .....                                        | 31        |
| 2.4.1 Princip MKP .....                                                   | 32        |
| 2.4.2 Využití MKP .....                                                   | 33        |
| <b>3 Experimentální část .....</b>                                        | <b>36</b> |
| 3.1 Zvolení materiálů a rozsahu teplot .....                              | 37        |
| 3.1.1 Materiál S355xx dle EN 10025-2 .....                                | 39        |
| 3.1.2 Materiál S690 Qx dle EN 10025-6 .....                               | 41        |
| 3.1.3 Materiál typu HB 400 .....                                          | 42        |
| 3.2 Příprava vzorků pro experiment .....                                  | 43        |
| 3.3 Použité zařízení pro zkoušky .....                                    | 48        |
| 3.4 Zjištění mechanických hodnot materiálů statickou zkouškou tahem ..... | 51        |
| 3.4.1 Diskuze výsledků ze statické zkoušky tahem .....                    | 54        |
| 3.5 Zjištění mechanických hodnot materiálů zkouškou tvrdosti .....        | 56        |
| 3.5.1 Diskuze výsledků ze zkoušky tvrdosti .....                          | 58        |



---

|          |                                                                         |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.6      | Zjištění mechanických hodnot materiálů rázovou zkouškou .....           | 58        |
| 3.6.1    | Diskuze výsledků ze zkoušky rázem.....                                  | 61        |
| <b>4</b> | <b>Numerická část.....</b>                                              | <b>62</b> |
| 4.1      | Popis zvoleného programu MKP – Ansys .....                              | 62        |
| 4.2      | Aplikace získaných hodnot pro simulační model výrobku fy. Triga-MF..... | 63        |
| 4.3      | Vyhodnocení a diskuze výsledků numerické simulace.....                  | 67        |
| <b>5</b> | <b>Závěr .....</b>                                                      | <b>68</b> |
| <b>6</b> | <b>Seznam použité literatury .....</b>                                  | <b>70</b> |
| <b>7</b> | <b>Přílohy.....</b>                                                     | <b>71</b> |



## Seznam použitých symbolů a zkratk

| Symbol nebo zkratka     | Jednotka              | Význam                                |
|-------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| <b>A</b>                | [ % ]                 | Tažnost                               |
| <b>A<sub>50mm</sub></b> | [ % ]                 | Tažnost materiálu                     |
| <b>a</b>                | [ mm]                 | Tloušťka                              |
| <b>Al</b>               | [ - ]                 | Hliník                                |
| <b>B</b>                | [ - ]                 | Bor                                   |
| <b>b</b>                | [ mm]                 | Šířka                                 |
| <b>C</b>                | [ - ]                 | Uhlík                                 |
| <b>c</b>                | [ mm/s]               | Rychlost                              |
| <b>Cu</b>               | [ - ]                 | Měď                                   |
| <b>Cr</b>               | [ - ]                 | Chrom                                 |
| <b>CAD</b>              | [ - ]                 | Computer Aided Design                 |
| <b>CAM</b>              | [ - ]                 | Computer Aided Manufacturing          |
| <b>CNC</b>              | [ - ]                 | Computer Numerical Control            |
| <b>D</b>                | [ mm]                 | Průměr                                |
| <b>E</b>                | [ MPa ]               | Modul pružnosti v tahu                |
| <b>E<sub>1</sub></b>    | [ J ]                 | Počáteční potenciální energie         |
| <b>E<sub>2</sub></b>    | [ J ]                 | Konečná potenciální energie           |
| <b>F</b>                | [ N ]                 | Zatěžující síla                       |
| <b>F<sub>e</sub></b>    | [ N ]                 | Síla na mezi kluzu                    |
| <b>F<sub>m</sub></b>    | [ N ]                 | Maximální naměřená síla               |
| <b>FEM</b>              | [ - ]                 | Finite element method                 |
| <b>g</b>                | [ m/s <sup>2</sup> ]  | Gravitační zrychlení                  |
| <b>G</b>                | [ MPa ]               | Modul pružnosti ve smyku              |
| <b>h</b>                | [ mm]                 | Výška                                 |
| <b>HB</b>               | [ - ]                 | Hardness Brinell                      |
| <b>k</b>                | [ - ]                 | Koeficient zaplnění plochy            |
| <b>K</b>                | [ J ]                 | Spotřebovaná nárazová práce           |
| <b>KC</b>               | [ J/cm <sup>2</sup> ] | Vrubová houževnatost                  |
| <b>ks</b>               | [ - ]                 | Kus                                   |
| <b>L<sub>0</sub></b>    | [ mm]                 | Počáteční délka                       |
| <b>L<sub>u</sub></b>    | [ mm]                 | Délka po přetržení vzorku             |
| <b>m</b>                | [ kg ]                | Hmotnost                              |
| <b>MKP</b>              | [ - ]                 | Metoda konečných prvků                |
| <b>Mn</b>               | [ - ]                 | Mangan                                |
| <b>Mo</b>               | [ - ]                 | Molybden                              |
| <b>N</b>                | [ - ]                 | Dusík                                 |
| <b>Nb</b>               | [ - ]                 | Niob                                  |
| <b>Ni</b>               | [ - ]                 | Nikl                                  |
| <b>P</b>                | [ Ω ]                 | Potenciální energie vnějšího zatížení |
| <b>P</b>                | [ - ]                 | Fosfor                                |
| <b>Pb</b>               | [ - ]                 | Olovo                                 |
| <b>Q1</b>               | [ - ]                 | Kvalita řezu                          |
| <b>R</b>                | [ MPa ]               | Smluvní jmenovité napětí              |
| <b>R<sub>e</sub></b>    | [ MPa ]               | Mez kluzu                             |





| Symbol nebo zkratka | Jednotka            | Význam                         |
|---------------------|---------------------|--------------------------------|
| $R_m$               | [ MPa ]             | Mez pevnosti                   |
| $R_{p0,2}$          | [ MPa ]             | Nevýrazná mez kluzu            |
| $R_U$               | [ MPa ]             | Mez úměrnosti                  |
| $R_x$               | [ MPa ]             | Mez pružnosti                  |
| $S$                 | [ - ]               | Síra                           |
| $S$                 | [ mm <sup>2</sup> ] | Průřez                         |
| $Si$                | [ - ]               | Křemík                         |
| $Sn$                | [ - ]               | Cín                            |
| $S_0$               | [ mm <sup>2</sup> ] | Počáteční průřez               |
| $S_u$               | [ mm <sup>2</sup> ] | Průřez v místě přetržení       |
| $T$                 | [ °C ]              | Teplota                        |
| $t$                 | [ s ]               | Čas                            |
| $Ti$                | [ - ]               | Titan                          |
| $TOO$               | [ - ]               | Teplem ovlivněná oblast        |
| $TUL$               | [ - ]               | Technická univerzita v Liberci |
| $u$                 | [ mm ]              | Střední hodnota vzdálenosti    |
| $U,V$               | [ - ]               | Tvar vrubu                     |
| $UH$                | [ - ]               | Ukazatel hlubokotažnosti       |
| $V$                 | [ - ]               | Vanad                          |
| $W$                 | [ Ω ]               | Energie napjatosti             |
| $Z$                 | [ % ]               | Kontrakce                      |
| $ZP$                | [ MPa ]             | Zásoba plasticity              |
| $Zr$                | [ - ]               | Zirkonium                      |
| $\varepsilon$       | [ - ]               | Poměrné prodloužení            |
| $\gamma$            | [ - ]               | Poměrná smyková deformace      |
| $\sigma$            | [ MPa ]             | Skutečné napětí                |
| $\Pi$               | [ Ω ]               | Celková potenciální energie    |
| $\tau$              | [ MPa ]             | Smykové napětí                 |
| <b>1D</b>           | [ - ]               | Jednorozměrný prostor          |
| <b>2D</b>           | [ - ]               | Dvourozměrný prostor           |
| <b>3D</b>           | [ - ]               | Třírozměrný prostor            |

## 1 Úvod

V dnešní době, ve které je na trhu mnoho konkurenčních firem, se snaží každý výrobce vyrábět svůj sortiment výrobků co nejkvalitněji, nejlevněji a nejrychleji. Toto jsou 3 nejdůležitější kritéria pro konkurenceschopnost firmy na trhu. Každá firma hledá optimální kompromis mezi těmito třemi kritérii. Stanovit tento kompromis je v současné době velký problém, se kterým se potýká mnoho firem po celém světě.

Kvalita je jedna z nejdůležitějších vlastností, kterou by měl výrobek splňovat, ale v dnešním spotřebním světě je mnohdy potlačena na úkor ceny. Pokud si chce firma udržet dobrou pověst na trhu a také chce nabízet svoje produkty za tržní ceny, musí hledat optimální řešení, jak ušetřit a přitom zachovat kvalitu svých výrobků. V současné době je na trhu mnoho nových technologií, materiálů a výpočetních programů, které nám mohou pomoci tento problém vyřešit. Pokud budeme chtít inovovat výrobu a použít jednu z výše uvedených možností, měla by tato změna také pomoci k zrychlení výroby a tedy i dodací lhůty. Je to jedno z dalších kritérií, podle kterých si zákazník vybírá firmu, od které si výrobek objedná.

Tato diplomová práce byla zadána a vypracována podle požadavků firmy TRIGA-MF spol. s r.o. (dále jen TRIGA-MF), která se dlouhodobě zabývá výrobou přídatných zařízení pro stavební a demoliční stroje. V převážné většině se jedná o kusovou nebo malosériovou výrobu, avšak s velkou výrobkovou řadou. Tato přídatná zařízení jsou používána za těžkých podmínek, ve kterých jsou vystaveny velkým rázům. Každý nový výrobek prochází před zahájením výroby kontrolou pomocí metody konečných prvků. Vstupní hodnoty pro výpočty jsou použity z materiálových listů. Takto prověřené výrobky odolávají těžkým podmínkám, přesto se v několika málo případech, zvláště v zimních měsících, stalo, že se na výrobku při používání vytvořily trhliny, proto byl následně reklamován.

Cílem této diplomové práce bylo zjistit, jestli mají teploty pod bodem mrazu výrazný vliv na mechanické vlastnosti a zda byly příčinou vzniku trhlin na výrobcích. Teplota byla zvolena podle prostředí, v kterém přídatná zařízení v praxi pracují. Jedná se o anizotropní materiály, proto byly testy voleny ve směru válcování a kolmo na směr válcování plechu. Výsledné hodnoty se mají pokusit zpřesnit výpočet v prostředí MKP,

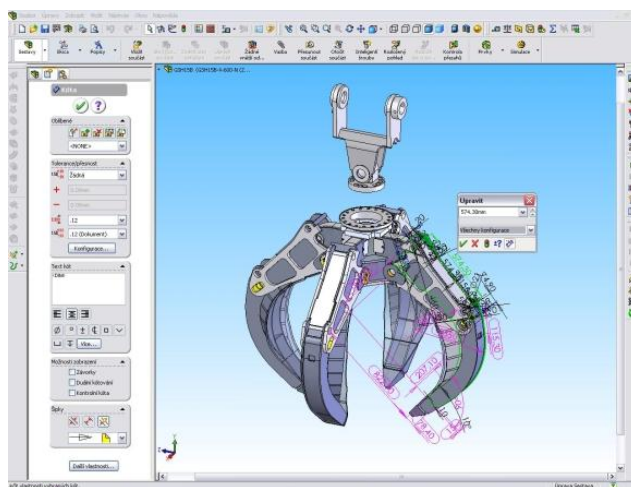
který by mohl určit optimální tloušťku a jakost materiálu a tím zlepšit kvalitu a případně cenu výrobků. Diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu studentské grantové soutěže 2822.

### 1.1 Firma Triga – MF spol. s r.o. [1]

TRIGA-MF se od roku 1994 zabývá designem, vývojem a výrobou vlastních výrobků, ale také spolupracuje s mnoha významnými mezinárodními společnostmi, kterým poskytuje zmíněné služby. Mezi významné společnosti, které tyto služby využívají, patří Caterpillar, Verachtert, Škoda-Auto, Terex, Bobcat, atd.

Mezi 3 hlavní aktivity firmy patří:

- Vývoj, výroba a prodej přídatného zařízení pro stavební stroje (obr. 1.1)
- Výroba a prodej speciálního servisního nářadí pro automobilový průmysl
- Prodej hydraulických komponentů



Obr. 1.1: Příklad vývoje drapáku podle požadavků zákazníka

Společnost TRIGA-MF disponuje značným množstvím zpracovaných podkladů přídatných zařízení pro různé stavební stroje. Pomocí těchto podkladů je schopna navrhnout a vyrobit nebo upravit speciální stavební komponenty a zařízení na základě požadavků zákazníka. Pro zpracování těchto podkladů využívá 3D program SolidWorks, ve kterém se velmi snadno návrhy a úpravy provádějí. Tento program byl vybrán pro jeho dobře zpracované uživatelské rozhraní.

Také vybavení firmy je na velmi dobré úrovni, které umožňuje řezání plazmou a kyslíko-acetylenovým plamenem, ohraňování a zakružování plechů. Dále sváření a obrábění, které mají ve firmě hlavní zastoupení. To zaručuje při výrobě ve větší míře jistou nezávislost výrobního programu na ostatních firmách.

Výrobní program je sice kusového nebo malosériového charakteru, ale jak už bylo výše zmíněno, nabídka výrobků je široká. Na obr. 1.2 je ukázka části sortimentu přídatných zařízení, které firma vyrábí. Výrobky se mění v závislosti na výrobcu, typu a hmotnosti stavebního stroje. Tím vzniká mnoho kombinací pro jednotlivé skupiny výrobků.



Obr. 1.2: Ukázka části sortimentu přídatných zařízení

Společnost vlastní velké množství strojního vybavení pro již zmíněné operace. Obrábění a sváření nebylo cílem této diplomové práce, proto jsou uvedeny pouze stroje pro tváření:

#### Zakružovačka plechu **FACCIN ASI/M 1,5x9/8**

- max. tloušťka plechu 9mm
- min. rádius zakružování 170mm
- max. zakružovaná délka 1500mm

Zakružovačka plechu **FACCIN 4HEL 2634**

- max. tloušťka plechu 24mm
- min. rádius zakružování 320mm
- max. zakružovaná délka 2500mm

Mechanický ohraňovací lis **STROJÁRNE PIESOK LODD 315/4000**

- Ohyby do délky 4000mm
- jmenovitá síla 3150 kN

NC ohraňovací lis **BAYKAL APHS 5100x800**

- Ohyby do délky 5100mm
- jmenovitá síla 8000 kN



Obr. 1.3: NC ohraňovací lis Baykal APHS 5100x800

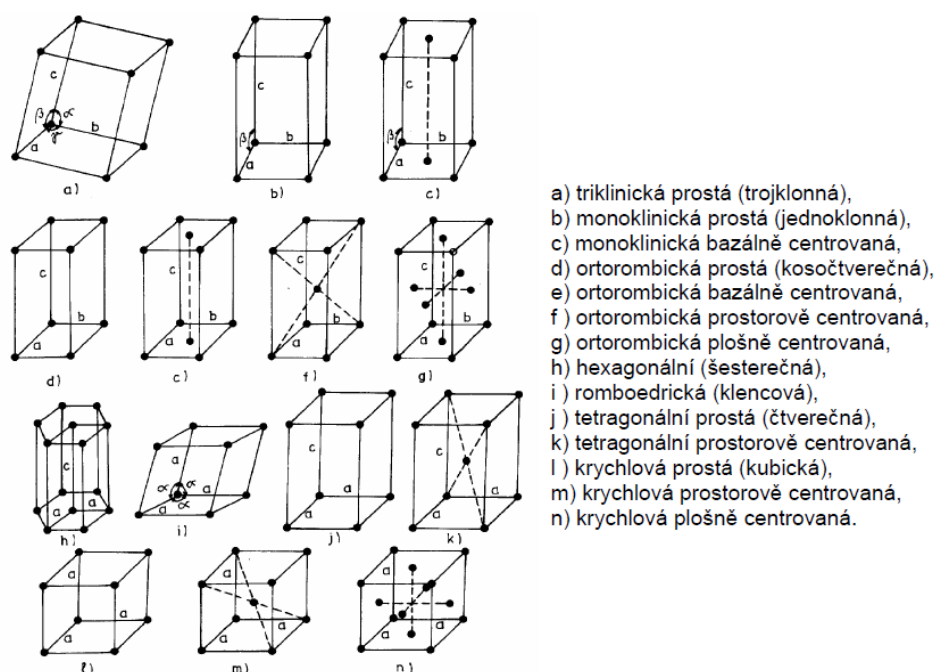
## 2 Teoretická část

### 2.1 Deformační chování materiálů [2]

Deformační chování je typické pro každý materiál. Při silovém zatížení kovových materiálů dochází nejdříve k tzv. elastické deformaci, při které nedochází k trvalým změnám tvaru. To znamená, pokud se materiál přestane silově zatěžovat, vrátí se do původního stavu. Jestliže je překročena příslušná mez materiálu (mez kluzu), dojde k trvalým změnám tvaru resp. rozměrů a nastává tzv. plastická deformace.

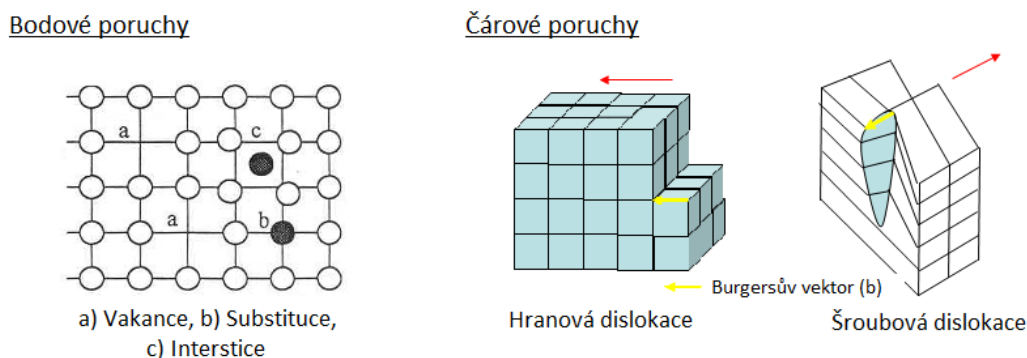
#### 2.1.1 Krystalografická struktura kovů a její poruchy [2], [3]

Pravidelné rozložení atomů v prostoru patří mezi základní vlastnosti kovů. Tomuto uspořádání jednotlivých atomů v prostoru se říká krystalová mřížka, ve které se atomy pravidelně opakují. Pro krystalovou mřížku je charakteristické rozložení atomů v prostoru podle jednotlivých geometrických uspořádání a souměrností. Nejmenší geometrický element, kterým při opakování lze vytvořit celou krystalickou mřížku, se nazývá elementární buňka. Obecně se rozlišuje sedm základních krystalových soustav, ve kterých je čtrnáct typů elementárních buněk, tzv. Bravaisových mřížek (obr. 2.1).



Obr. 2.1: Typy elementárních buněk

Mřížka skutečných krystalů není nikdy dokonalá. To je zapříčiněno pohyblivostí atomů, přítomností nečistot a dalšími vlivy, které mohou v krystalové mřížce kovu způsobit vady (poruchy). Vady mají velký vliv na mechanické vlastnosti, proto je potřeba tyto vady eliminovat, aby struktura reálného krystalu obsahovala vad co nejméně. Jsou jisté případy poruch, které mohou být naopak velmi prospěšné. Jedná se o dislokace. Jejich pohyb, vznik a zánik podporuje proces plastické deformace. Hustota dislokací ovlivňuje pevnost kovu. Rozeznáváme 4 druhy mřížkových poruch. Jsou to bodové, čárové, plošné a prostorové. Z hlediska plastických přetvoření mají největší vliv a význam bodové a čárové poruchy. Příklady těchto dvou vad v krystalové struktuře kovů jsou znázorněny na obr. 2.2.



Obr. 2.2: Poruchy ve stavbě krystalové mřížky

### 2.1.2 Elastická deformace [2]

Elastická (pružná) deformace je stav, kdy se materiál po odlehčení vrátí zpět do původního tvaru, jedná se tedy o vratnou deformaci. Na obr. 2.3 je názorně ukázáno, jak se materiál, který je takto deformován chová. Pro tváření kovů má největší význam plastická deformace, ale i s elastickou deformací se musí počítat, protože má vliv na finální tvar výrobku. Průběh elastické deformace popisuje matematický vztah vyjádřený Hookovým zákonem pro normálové napětí  $\sigma$  a smykové napětí  $\tau$ .

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (2.2)$$

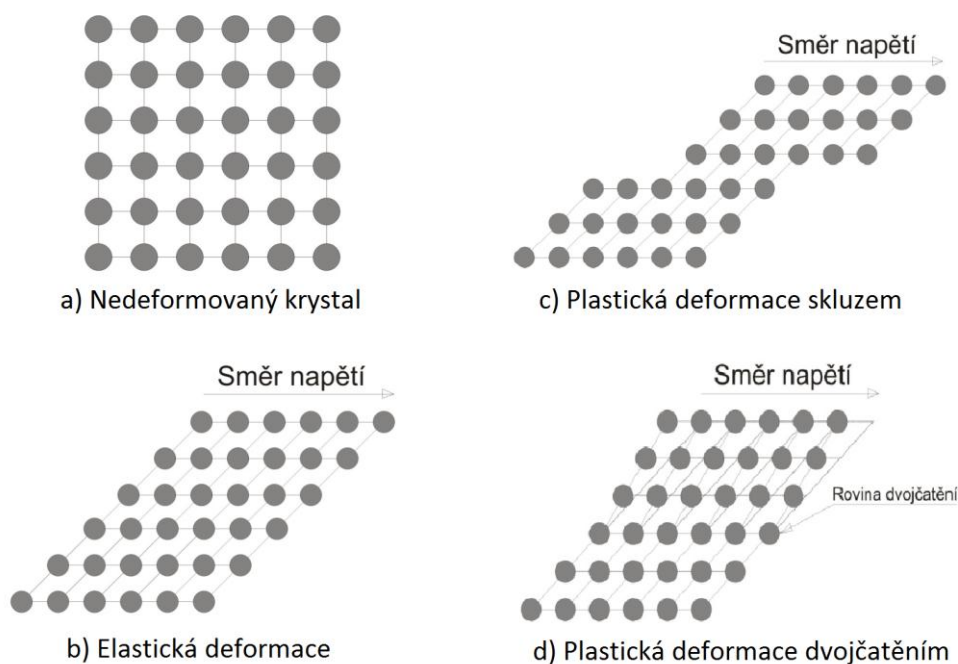
Kde:                      E ... modul pružnosti v tahu                      [MPa]



|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| $\varepsilon$ ... poměrné prodloužení  | [-]   |
| $G$ ... modul pružnosti ve smyku       | [MPa] |
| $\gamma$ ... poměrná smyková deformace | [-]   |

### 2.1.3 Plastická deformace [2]

Plastická deformace je na rozdíl od elastické deformace trvalá. Po odlehčení se materiál nevrátí do původního tvaru, protože došlo k porušení krystalové mřížky. Pro dosažení plastické deformace je potřeba překonat mez kluzu, která je mezní hodnotou elastické (pružné) deformace. Existují dva druhy mechanismů plastické deformace. Nejčastější a nejznámější mechanismus je skluz dislokací, který se realizuje pohybem dislokací ve skluzových systémech. Další mechanismus plastické deformace se nazývá dvojčatění, ale ten je méně obvyklý. Pro jeho vznik musí nastat jisté specifické podmínky, které jsou splněny při rychlém průběhu deformace, nízké teplotě a určitém chemickém složení materiálu. Při tváření se uplatňují všechny mechanismy plastické deformace najednou, ale rozvíjí se pouze ten mechanismus, který při daných podmínkách vyžaduje nejmenší napětí. Na obr. 2.3 jsou zobrazeny různé stavy krystalu, podle druhu deformace.



Obr. 2.3: Elastická a plastická deformace



## 2.2 Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení [4], [5]

Pro správné a hospodárné využití kovů, musíme dobře znát jejich vlastnosti a umět je co nejpřesněji zjišťovat. K zjištění nebo ověření těchto vlastností se používají různé mechanické zkoušky. Tyto zkoušky se mohou provádět při statickém, dynamickém a cyklickém namáhání za laboratorních nebo skutečných provozních podmínek. Získané hodnoty požadovaných vlastností materiálů lze použít pro výpočet nebo pro porovnání s hodnotami požadovanými v technické praxi.

### Vlastnosti materiálů se dělí na:

**Fyzikální** – popisují chování materiálů po fyzikální stránce (např. tepelnou vodivost, elektrickou vodivost, délkovou a objemovou roztažnost)

**Chemické** – popisují chování materiálů při kontaktu s chemickými účinky kapalného nebo plynného prostředí (Odolnost proti korozi)

**Mechanické** – popisují chování materiálů při mechanickém namáhání vnějšími silami (pevnost, pružnost, tvárnost, tvrdost, houževnatost)

**Technologické** - popisují chování materiálů při určitém technologickém zpracování. (tvárnost, svařitelnost, obrobitelnost, atd.)

Zmíněné vlastnosti se zjišťují provozními nebo laboratorními zkouškami. Podle nich se stanoví, jestli má materiál potřebné vlastnosti pro dané použití. Vybrané vlastnosti pro každý materiál jsou uvedeny v technicko-dodavatelských listech nebo v normách.

### Zkoušky materiálů se dělí na:

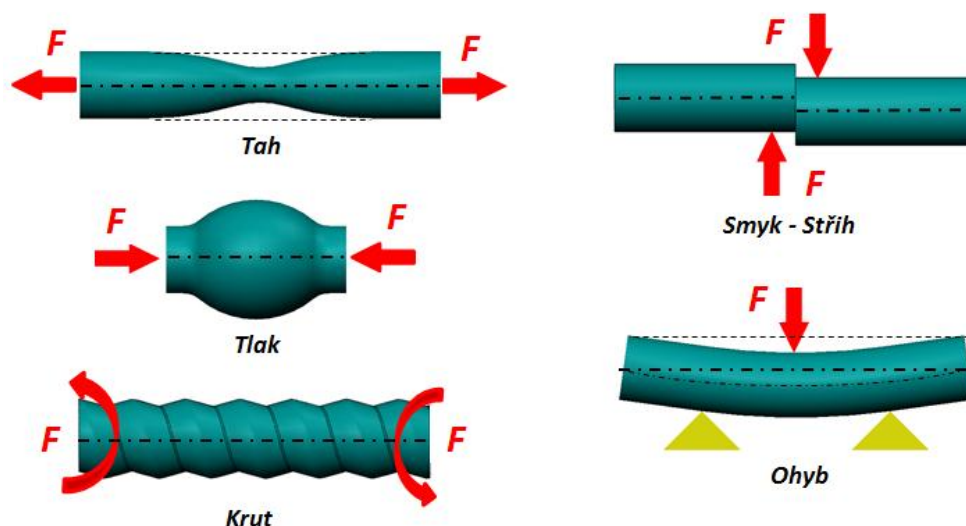
- mechanické
- technologické
- chemické
- fyzikální
- defektoskopické

## Základní zkoušky mechanických vlastností

Tyto zkoušky jsou jedny z nejpoužívanějších a nejdůležitějších z hlediska pevnostních výpočtů strojních součástí, proto jim bude věnována větší pozornost níže.

### Zkoušky statické

Zkušební vzorek je namáhán vnější klidovou silou nebo silou plynule se měnící. Zatěžující síla vyvolává nejdříve pružné, poté plastické deformace až do porušení vzorku. Jedná se o zkoušky destruktivní, protože se při nich vzorek znehodnotí. Podle způsobu působení zatěžující síly (obr. 2.4) rozdělujeme tyto zkoušky na zkoušky pevnosti v tahu, tlaku, ohybu, krutu a střihu.



Obr. 2.4: Základní druhy namáhání materiálů

### Zkoušky dynamické a cyklické

Zkušební vzorek je namáhán rázovou silou nebo cykly, při kterých se opakuje zatěžování a odlehčování vzorku. Sleduje se počet cyklů zatížení a odlehčení při určitém způsobu namáhání do vzniku prvních trhlinek na zkušebním vzorku. Při tomto druhu namáhání dochází často k náhlému porušení materiálu, i když zatěžující síla ještě nedosáhla statické pevnosti materiálu. Proto nelze zjistit tyto údaje o chování takto namáhaného materiálu statickými zkouškami. Teplota je další faktor, který může ovlivnit průběh všech druhů zkoušek, proto se musí vždy při experimentálním měření zohlednit.

## **Zkoušky tvrdosti**

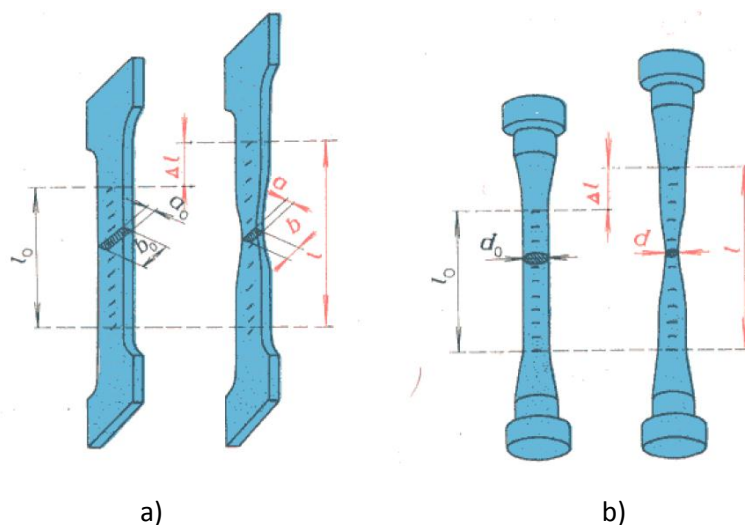
Tvrdost je mechanická vlastnost definovaná jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Zkoušky tvrdosti se dělí podle charakteru zátěžné síly na statické a dynamické.

## **Zkouška rázem**

Používá se k zjištění, kolik práce nebo energie se spotřebuje na porušení zkušební tyče. Zkouší se nejčastěji jedním rázem, kdy se na porušení zkušební tyčky použije najednou dostatečné množství energie. Rázem lze zkoušet pevnost v tahu, tlaku, ohybu nebo krutu. Tato zkouška je dobrým ukazatelem houževnatosti nebo křehkosti materiálů.

### **2.2.1 Zkouška tahem [5], [6], [7]**

Zkouška tahem dle normy ČSN EN ISO 6892-1 je nejrozšířenější statickou zkouškou. Jedná se tedy o zkoušku, která probíhá za normou předepsaných teplotně – rychlostních podmínek ( $T-c(\phi)$ ). Provádí se téměř u všech materiálů, protože díky ní získáme některé základní hodnoty potřebné pro výpočet konstrukčních částí a volbu vhodného materiálu. Zkouška je založena na postupném zatěžování zkušební tyče, jednoosým tahovým napětím až do úplného přetržení. Existují dva základní druhy zkušebních tyčí – ploché a válcové (obr. 2.5), které mají normalizované tvary a také rozměry.



Obr. 2.5: Tvary zkušebních tyčí – a) Plochá, b) Válcová

### 2.2.1.1 Mechanické vlastnosti [5], [6], [7]

Aleš Emmerling

Níže bude vysvětlen význam těchto bodů, také zde budou popsány hlavní a vedlejší ukazatelé.

### **Význam jednotlivých bodů:**

**Bod U:** Mez úměrnosti ( $R_u$ ) – je to maximální napětí, pro které platí Hookův zákon, tzn. že napětí je přímo úměrné prodloužení.

**Bod E:** Mez pružnosti ( $R_x$ ) – je výrazně zpřísněná mez kluzu, která se určuje pouze u materiálů s nevýraznou mezí kluzu. Index  $x$  je menší než 0,2 (např. 0,01) a označuje maximální povolenou trvalou deformaci 0,01% z  $L_0$ .

**Bod K:** Mez kluzu ( $R_e$ ) – je napětí, při kterém se zkušební tyč začne výrazně prodlužovat, aniž by stoupala zatěžující síla. To je hranice napětí, nad kterou vznikají plastické (nevratné) deformace.

**Bod P:** Mez pevnosti ( $R_m$ ) – je smluvní hodnota napětí daného podílem největší zatěžující síly, kterou snese zkušební tyč, a původního průřezu tyče. V tomto okamžiku se začne na zkušební tyči objevovat nenápadné zúžení (krček), část energie se spotřebuje na tvorbu krčku, nastává pokles napětí a dochází k přetržení tyče.

### **Hlavní ukazatele zkoušky tahem**

Hlavní ukazatelé popisují jednotlivé materiály z hlediska pružnosti, pevnosti a slouží k vzájemnému porovnání jednotlivých materiálů mezi sebou.

**Mez kluzu  $R_e$**  - dělíme na výraznou a nevýraznou. U výrazné se mez kluzu dělí na dolní ( $R_{eH}$ ) a horní ( $R_{eL}$ ), pro výpočet se pak použije síla naměřená na této výrazné mezi kluzu ( $F_e$ ). Na obr. 2.7 b, c jsou ukázány pracovní diagramy s výraznou mezí kluzu.

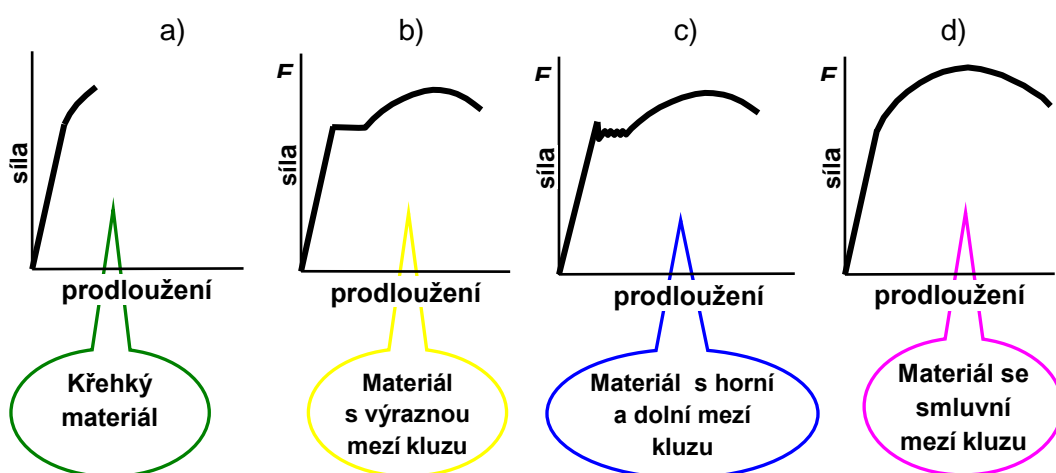
$$R_e = \frac{F_e}{S_0} [MPa] \quad (2.3)$$

Kde:  $F_e$  ... síla odpovídající výrazné mezi kluzu [N]

**Nevýrazná mez kluzu  $R_{p0,2}$**  – Vzhledem k těžko stanovitelnému bodu se zavedla smluvní mez kluzu ( $R_{p0,2}$ ). To znamená, že zkušební tyč po odlehčení zůstane prodloužena maximálně o 0,2% z délky  $L_0$ . Pracovní diagramy s nevýraznou mezí kluzu jsou zobrazeny na obr. 2.7 a, d.

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} [MPa] \quad (2.4)$$

Kde:  $F_{p0,2}$  ... síla odpovídající trvalé absolutní deformaci  $\varepsilon = 0,2$  [-]



Obr. 2.7: Základní typy tahových diagramů kovových materiálů

#### Mez pevnosti $R_m$

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [MPa] \quad (2.5)$$

Kde:  $F_m$  ... maximální naměřená síla [N]

**Tažnost  $A$**  – je poměr prodloužení zkušební tyče po přetržení vůči počáteční délce tyče, vyjádřený v procentech.

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (2.6)$$

Kde:  $L_u$  ... délka po přetržení vzorku [mm]

**Kontrakce Z** - je to poměr zúžení průřezu vzorku po přetržení vůči původnímu průřezu vyjádřený v procentech.

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 [\%] \quad (2.7)$$

Kde:  $S_u$  ... průřez tyče v místě přetržení [mm<sup>2</sup>]

### **Vedlejší ukazatele zkoušky tahem**

Z hlavních ukazatelů mohou být odvozeny vedlejší ukazatele zkoušky tahem. Tyto ukazatele mají spíše technologický charakter a popisují vhodnost materiálu z hlediska tvárnosti.

**Ukazatel hlubokotažnosti UH** je důležitý hlavně při výběru jakosti plechu pro hluboké tažení, tento ukazatel je bezrozměrný.

$$UH = \frac{R_{p0,2}}{R_m} [-] \quad (2.8)$$

**Zásoba plasticity ZP** je dalším ukazatelem určujícím tvárnost při hlubokém tažení, který je z velké části ovlivněn tažností zkoušeného materiálu.

$$ZP = k \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot A [MPa] \quad (2.9)$$

Kde:  $k$  ... koeficient zaplnění plochy [-]

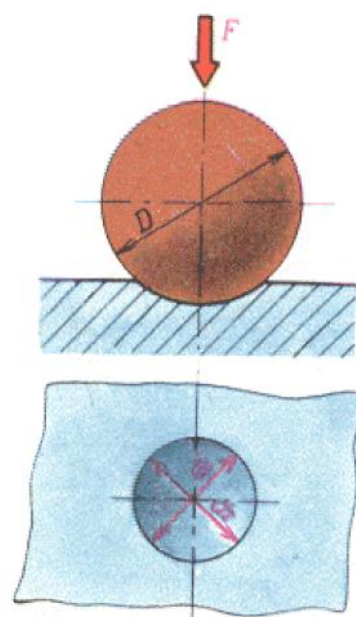
### **2.2.2 Zkoušky tvrdosti [6], [7]**

Tyto zkoušky jsou hlavně u kovových materiálů mimořádně důležité, protože se mohou provést nejrychleji, nejlevněji i na předmětech menších rozměrů. Jejich výhodou je, že se mohou použít přímo na hotových výrobcích bez jejich znehodnocení. Tvrdost je definována jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Z naměřených hodnot tvrdosti se také dají přibližně odvodit i některé další vlastnosti materiálu (pevnost v tahu, obrobitelnost apod.). Zkoušky tvrdosti se dělí na vrypové,

vnikací a odrazové. V praxi jsou nejpoužívanější tzv. vnikací zkoušky, které jsou níže detailněji popsány.

### Zkouška tvrdosti podle Brinella

Tvrdost dle normy ČSN EN ISO 6506-1 se zjišťuje pomocí tvrdokovové kuličky o průměru  $D = 10, 5, 2,5, 1$  mm, která je vtlačována rovnoměrně stupňovanou silou  $F = 300.D, 100.D, 50.D, 25.D$  kp ( $1\text{kp} = 9,81\text{N}$ ), po dobu  $t = 10, 30, 60, 120, 180$  s, do lesklé rovné plochy zkoušené součásti nebo vzorku. Zkouška se především používá pro zjištění tvrdosti měkkých ocelí, šedé litiny, neželezných kovů (Al, Cu, Sn, Pb) a jejich slitin. Pro měkké materiály se používá největší průměr kuličky a naopak. Tvrdost se určuje podle průměru vtisku, který se měří ve dvou na sebe kolmých směrech, aby byly eliminovány chyby vzniklé nepřesností vtisku (obr. 2.8). Výsledné hodnoty *HBW* musí také obsahovat značení podmínek zkoušky tj. **xxx HBW D[mm]/F[N]/t[s]**, pouze za nejběžnějších podmínek měření **xxx HBW 10/3000/10** se nemusí značit a výsledek se zapíše např. **200 HBW**.



Obr. 2.8: Zkouška tvrdosti dle Brinella

### Zkouška tvrdosti podle Rockwela

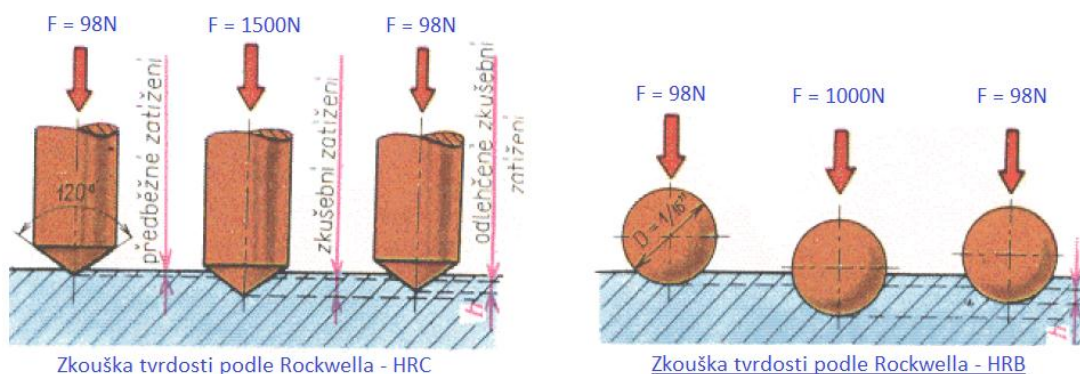
Tvrdost se zjišťuje pomocí vtisku diamantového kužele s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  a poloměrem zaoblení hrotu  $R = 0,2$  mm nebo tvrdokovové případně kalené ocelové kuličky o průměrech  $D = 1,5875$  a  $3,175$  mm do zkoušeného materiálu (obr. 2.9). Plocha, na které se provádí zkouška, nemusí být nijak zvláště upravená, proto se ve velké míře používá pro sériové kontrolní zkoušky kalených, zušlechťovaných nebo jinak tepelně zpracovaných ocelí. Před vlastním měřením tvrdosti je nejprve indenter předběžně zatížen  $98$  N proto, aby měření bylo co nejméně ovlivněno stavem povrchu. Poté se zvolna zvětšuje zatěžující síla cca  $6$  s na zatížení



předepsané normou (celkové), které se po jeho dovršení zase pomalu snižuje až na původní předběžné zatížení 98N. Zjišťuje se hloubka vtisku, která je měřena mezi stavem předběžného a celkového zatížení. Hloubka je změřena a převedena pomocí Rockwellova tvrdoměru a zobrazena na číselníku. Tvrdost se označuje písmeny *HR* a dalším písmenem (*A* až *K*), které označuje použitou stupnici. Nejběžněji používané stupnice jsou *B* a *C*. Značka tvrdosti se dále doplňuje písmenem, které určuje, jestli byla použita pro zkoušku kalená ocelová kulička (*S*) nebo kulička z tvrdokovu (*W*). Níže je uveden příklad nejpoužívanějších zkoušek tvrdosti dle Rockwella podle stupnice *B* a *C* (obr. 2.9).

**HRBS** - tvrdost určená kalenou ocelovou kuličkou o průměru 1,5875mm při celkovém zatížení 980 N (pro měkké kovy).

**HRC** - tvrdost určená diamantovým kuželem při celkovém zatížení 1471 N (pro tepelně zpracované ocele a litiny).



Obr. 2.9: Nejpoužívanější zkoušky tvrdosti podle Rockwella

### Zkouška tvrdosti podle Vickerse

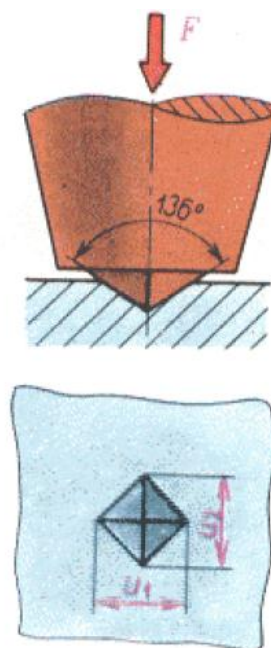
Vickersova zkouška dle normy ČSN EN ISO 6507-1 je založena na stejném principu jako zkouška Brinellova, liší se pouze indentorem. Ten tvoří diamantový pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136°, který svírají protilehlé stěny. Úhel je volen tak, aby výsledek byl co nejméně ovlivněn třením a výsledné hodnoty byly podobné jako při zkoušce dle Brinella. Indentor je vtlačován po stanovenou dobu určeným zatížením do zkoušeného materiálu. Obvyklá zatížení jsou 9,8; 29,4; 49; 98; 294 a 400 N (1N = 0,102kp). Po odlehčení je změřena pomocí okuláru nebo projekce

délka obou úhlopříček a vypočítána střední hodnota  $u$  (obr. 2.10). Tvrdost se značí  $HV$  a je určena poměrem zatěžovací síly a plochy vtisku, vypočítá se:

$$HV = 0,1891 \frac{F}{u^2} \quad (2.10)$$

Kde:  $F$  ... zatěžovací síla [N]

Tato zkouška je ze všech dosavadních metod jediná, která splňuje všechny nejen teoretické požadavky. Dává jednotnou stupnici tvrdosti od nejměkčích kovů až po nejtvrdší kalené ocele. Hodnoty tvrdosti jsou na velikosti zatížení prakticky nezávislé, ale je třeba ho uvádět spolu s naměřenou hodnotou. Naměřené hodnoty tvrdosti jsou velmi přesné, ale nevýhodou je, že zkoušený povrch musí být opracován na určitou drsnost. Pouze u hrubozrnných a nehomogenních kovů (šedá litina, ložiskové kompozice, atd.) se tato metoda nedá použít, protože z malého vtisku nelze určit jednoznačné výsledky.



Obr. 2.10: Zkouška tvrdosti dle Vickerse

### 2.2.3 Zkouška rázem [7]. [8]

Slouží k zjištění, kolik práce nebo energie se spotřebuje na porušení zkušební tyče. Zkouší se většinou jedním rázem, při kterém se použije najednou dostatečně velké množství energie na porušení zkušební tyčky. Rázem se může zkoušet pevnost v tahu, tlaku, ohybu nebo krutu. Nejpoužívanější jsou zkoušky rázem v ohybu, které jsou dobrým ukazatelem houževnatosti nebo křehkosti materiálů. Z tohoto druhu zkoušek se nejčastěji používá zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kyvadlovém kladivu, která bude níže podrobněji popsána.

### Zkouška vrubové houževnatosti

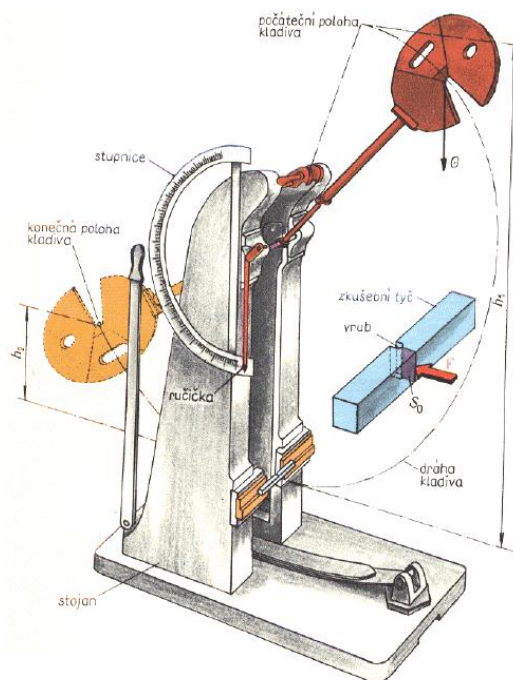
Vrubová houževnatost dle normy ČSN EN 10045-1 se zjišťuje pomocí Charpyho kladiva (obr. 2.11), které je zavěšeno na stojanu a uloženo tak, aby s ním bylo možné otáčet kolem své osy. Nejprve se kladivo zdvihne a upevní v počáteční poloze. V nejnižší poloze kladiva se založí do držáku na stojanu zkušební tyč ze zkoušeného materiálu. Po uvolnění z počáteční polohy se kladivo začne pohybovat po kruhové dráze, až narazí na zkušební tyč. To ji přerazí a vykývne se do konečné polohy. Konečná poloha je nižší než poloha počáteční, protože se při přeražení zkušební tyče spotřebovala určitá práce. Tato práce se nazývá spotřebovaná nárazová práce a je dána rozdílem potenciálních energií. Značí se  $K$  [J] a vypočte se:

$$K = E_1 - E_2 = m \cdot g \cdot h - m \cdot g \cdot h' \quad [\text{J}] \quad (2.11)$$

Kde:  $E_1$  ... Potenciální energie kladiva před zkouškou [J]

$E_2$  ... Potenciální energie kladiva po zkoušce [J]

Nárazová práce se stanovuje v joulech a je měřítkem odolnosti materiálu proti rázovému namáhání.



Obr. 2.11: Zkouška vrubové houževnatosti pomocí Charpyho kladiva

Při zkoušce se také hodnotí vzhled lomové plochy. Ten závisí na způsobu, jakým lom proběhl. Pokud se při nárazu kladiva vzorek výrazně plasticky deformuje, označuje se tento lom jako houževnatý nebo tvárný. V opačném případě, kdy přelomení předchází pouze nepatrná deformace, označuje se lom jako křehký nebo štěpný. Zkouška rázem se obvykle provádí několikrát pro větší rozsah teplot. Z naměřených hodnot se získá přechodová křivka, která vyjadřuje závislost nárazové práce na teplotě. Z naměřených přechodových křivek se určí tranzitní teplota, která je mezní mezi chtěným houževnatým a nechtěným křehkým lomem. Existuje několik způsobů určení tranzitní teploty, které je možno rozdělit na ty, které jsou definovány pomocí velikosti nárazové práce a vzhledem lomové plochy.

#### **Velikost nárazové práce:**

**Tranzitní teplota 27 J ( $T_{27J}$ )** – je to teplota, při které nárazová práce potřebná na přeražení vzorku dosáhne hodnoty 27 J.

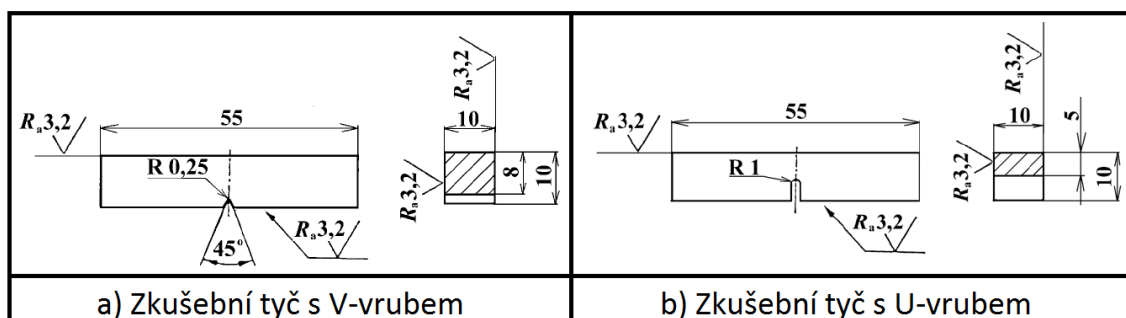
**Tranzitní teplota 0,5 ( $T_{0,5}$ )** – je to teplota, při které nárazová práce potřebná na přeražení vzorku dosáhne průměrné hodnoty určené vztahem:

$$K(V, U)_{50\%} = \frac{K(V, U)_{\min} - K(V, U)_{\max}}{2} \quad [\text{J}] \quad (2.12)$$

#### **Vzhledu lomové plochy zkušební tyče po přeražení:**

**Tranzitní teplota 50 % ( $T_{50\%}$ )** – je to teplota, při které procento tvárného lomu na lomové ploše dosáhne právě 50 %. Procento tvárného lomu zjišťujeme měřením rozměrů štěpně porušené oblasti na lomové ploše.

Pro zkoušku je také velmi důležitý zkušební vzorek. Ten je předepsán normou a má tvar tyče čtvercového průřezu s délkou strany 10 mm a délkou 55 mm. Na straně vzorku je vytvořen vrub, který má tvar U nebo V (obr. 2.12). Pokud není možno ze zkoušeného materiálu zhotovit tuto zkušební tyč, musí se použít zkušební tyč menších rozměrů o šířce 7,5 mm nebo 5 mm.



Obr. 2.12: Zkušební tyče pro zkoušku vrubové houževnatosti.

V závislosti na použitém typu vrubu se nárazová práce přepočítává na vrubovou houževnatost, která se značí *KCV* nebo *KCU*. Tento přepočet slouží v podstatě jen pro porovnávání.

$$KC(\text{typ vrubu}) = \frac{K(\text{typ vrubu})}{S_0} \quad [\text{J/cm}^2] \quad (2.13)$$

Kde: *KC(typ vrubu)* ... Vrubová houževnatost vzorku s V, U vrubem [*J/cm*<sup>2</sup>]

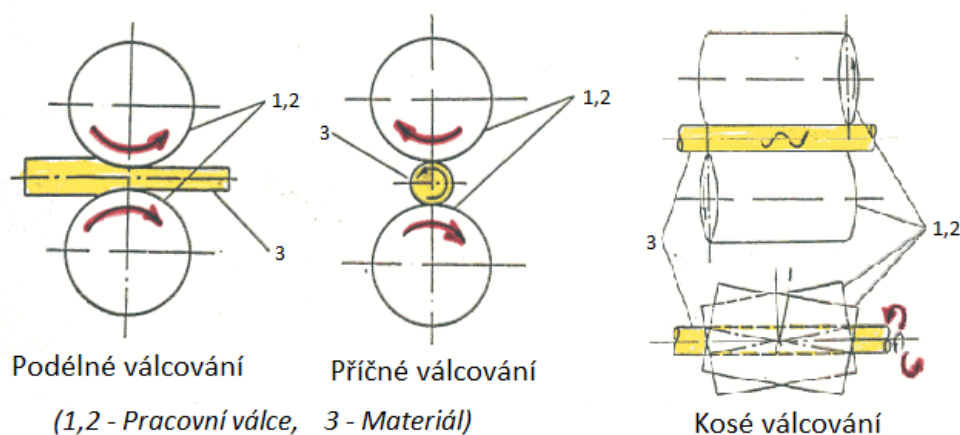
*K(typ vrubu)* ... Nárazová práce pro vzorek s V nebo U vrubem [*J*]

*S*<sub>0</sub> ... Plocha průřezu v místě vrubu [*cm*<sup>2</sup>]

## 2.3 Válcování [3]

Válcování je objemové tváření, při kterém je trojosá napjatost. Jedná se o kontinuální proces, při kterém se materiál deformuje na válcovacích stolicích pomocí otáčejících se válců za podmínek převažujícího všestranného tlaku. Tento druh technologie může probíhat v závislosti na požadovaných vlastnostech materiálu při libovolných teplotách a to za tepla, za poloohřevu a také za studena.

Válcovaný materiál je deformován mezi válci, tím dochází ke snižování výšky, k prodlužování a současně k rozšiřování materiálu. Tento proces je možný pouze v důsledku tření mezi pracovními válci a válcovaným materiálem. Mezera mezi pracovními válci se na válcovací dráze postupně snižuje, až na požadovaný rozměr. Konečný výrobek válcování se nazývá vývalek. Válcování se dělí podle směru, kterým válcovaný materiál prochází pracovními válci na podélné, příčné a kosé (obr. 2.13).



Obr. 2.13: Princip podélného, příčného a kosého válcování

### 2.3.1 Pracovní válce a válcovací tratě [3]

Pracovní válce mají tvar válcový, válcový s kuželovým zakončením nebo kotoučový. Jejich provedení je přizpůsobeno jednotlivým operacím, které mají vykonávat.

Kontinuální proces výroby zajišťuje válcovací trať, která obsahuje ucelený soubor strojů, potřebných k válcování. Válcovací tratě mají různý počet válcovacích stolic, které jsou seskupeny do několika výrobních linek. Ty se skládají ze základních a pomocných zařízení, např. pro pohyb materiálu, ohřev, rovnání, apod. Navrhují se podle požadavků na vývalek. Hrubé předvalky se válcují na malém počtu stolic s velkými úběry a jednotlivé operace se provádějí opakováním proběhů při novém nastavení válcovací mezery. Jemné předvalky a vývalky se válcují na větším počtu stolic, kde každá stolice je seřizena pro jednu operaci. Po válcování musí ještě následovat kalibrace rozměrů, jakosti struktury, povrchu a tvaru, ta je vždy závislá na tvaru a vlastnostech konečného polotovaru. Válcovací tratě se mohou dělit podle mnoha hledisek např.:

- a) Podle konstrukce válcovací stolice nebo počtu válců ve stolici  
na duo, trio, kvartu, mnohoválcové stolice, planetové stolice a speciální stolice
- b) Podle druhu vývalků a průměru pracovních válců na stolice  
pro výrobu drátů, plechů, univerzální, hrubé, střední, atd.

- c) Podle způsobu otáčení válců  
na jednosměrné a zpětné

### 2.3.2 Válcování plechů [3]

Plech se válcují z plochých předvalků na válcovacích stolicích s hladkými válci. Materiál se nejprve válcuje napříč, aby bylo dosaženo potřebné šířky plechu, poté se plech otočí o  $90^\circ$  a válcování probíhá podélně. Pomocí tohoto způsobu válcování je dosaženo stejnoměrné tloušťky a snížení plošné anizotropie. I když dojde k snížení plošné anizotropie, pořád zůstává jistý rozdíl mezi vlastnostmi v podélném a příčném směru válcování. To je způsobeno v důsledku větší deformace zrna v jednom směru, které má pak protáhlejší tvar, tzv. texturu. Proto jsou vlastnosti závislé právě na směru textury. U plechů zpravidla platí, že lepší mechanické vlastnosti, zvláště tažnost, vykazují ve směru podélného válcování.

Plech se dělí z hlediska výroby na válcované za tepla a za studena. Válcováním za studena se vyrábějí plechy s hladkým povrchem a velkou přesností, i když výchozí polotovár je válcovaný za tepla. Dále se plechy dělí na tenké a tlusté, kde hraniční tloušťka dle ČSN je 3,75 mm. V dnešní době se převážně plechy vyrábějí jako pásy a rozstřihují se po válcování na tabule.

## 2.4 Simulace v prostředí MKP [9]

Experimentální měření zkušebního vzorku nebo analytické vyjádření je omezeno jen pro určité informace. To znamená, že nám nemůžou přesně vyjádřit, jak se materiál bude chovat v navrhovaném výrobku. Se stále zvyšujícími se nároky na kvalitu a přesnost výrobku, s odpovídající životností a bezpečností při neustálém snižování výrobních nákladů se v současné době pro dosažení těchto požadavků využívají modelové simulace pomocí numerických metod. Jedna z nejrozšířenějších inženýrských metod je metoda konečných prvků (MKP), díky níž můžeme modelovat a optimalizovat reálné tvary výrobků a zařízení. MKP je využívána od 50. let minulého století. V této době došlo k rozšíření číslicových počítačů a to vedlo k výraznému rozvoji metody, protože počítače umožnily efektivní řešení větších soustav algebraických rovnic. Samotný název metoda konečných prvků resp. její anglická verze Finite Element

Method nám říká, že základem metody je prvek konečných rozměrů na rozdíl od infinitesimálního (diferenciálního) elementu, z čehož se vychází při řešení analytické pružnosti. Rozvoj MKP vedl ke vzniku velkého množství programů, postavených na základě algoritmu MKP a vyvíjených nejprve jen na univerzitní půdě při řešení výzkumných úkolů.

#### 2.4.1 Princip MKP [9]

Při řešení úloh obecné pružnosti (např. tahová zkouška, zatížení konstrukce, ohyb, atd.) prostřednictvím MKP, může být využito dvou možností řešení a to řešení analytického a řešení numerického. Základním principem MKP jako variační metody je to, že se problém hledání nekonečného počtu neznámých parametrů převede na řešení konečného počtu neznámých parametrů. Pomocí těchto neznámých parametrů se hledané funkce přibližně aproximují. V MKP se to označuje jako diskretizace spojitého problému. Výhody analytického přístupu jsou jednoznačné v případě nalezení řešení v uzavřeném tvaru, kde máme k dispozici obecnou funkční závislost mezi vstupními a výstupními veličinami řešeného problému pružnosti. Snadno lze pak posoudit výstupní hledané veličiny (napětí, posuvy) v závislosti na počátečních podmínkách (zatížení, tvar geometrie). Nevýhodou je, že analytické řešení v uzavřeném tvaru je využitelné pouze pro velmi omezené množství řešených úloh. Většinou to jsou geometricky jednoduché tvary. Naproti tomu pomocí MKP lze řešit prakticky jakoukoliv úlohu, která je geometricky složitá nebo jinak komplikovaná (osamělé, plošné zatížení, kontakty). Jediným omezením je výkonnost hardwaru a dostupnost odpovídajícího programového softwaru. Z toho pak plynou rozdílné časové nároky na výpočet. Výsledky se vztahují k řešenému počátečnímu problému, proto jakékoli další úpravy, optimalizace apod. vyžadují opakování celého náročného procesu řešení. Výsledky tvoří základ „inženýrského citu“, nutného k posouzení numerických výsledků. MKP využívá při výpočtu deformační variantu postavenou na Lagrangeovu variačním principu. To lze zjednodušeně popsat tím, že mezi všemi funkcemi posuvů, které zachovávají spojitost tělesa a splňují vstupní okrajové podmínky, se realizují jen ty, které udělají celkové potenciální energii  $\Pi$  zatíženého tělesa stacionární hodnotu. Popsat to lze vztahem (2.14).



$$\Pi = W - P \quad (2.14)$$

Kde:  $W$  ... je energie napjatosti řešeného tělesa  $[\Omega]$

$P$  ... je potenciál vnějšího zatížení na těleso  $[\Omega]$

Energie napjatosti  $W$  lze vyjádřit podle vztahu (2.15) a potenciál vnějšího zatížení  $P$  lze vyjádřit podle vztahu (2.16). Schéma zatíženého tělesa  $\Omega$ , které je zatíženo tlakem  $p$  a je uloženo na okrajových podmínkách  $\Gamma_p$  je znázorněno na obr. 2.14.

$$W = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \sigma^T \varepsilon dV \quad (2.15)$$

$$P = \int_{\Omega} u^T o^T dV + \int_{\Gamma_p} u^T p dV \quad (2.16)$$

kde v uvedených vztazích vystupují sloupcové matice

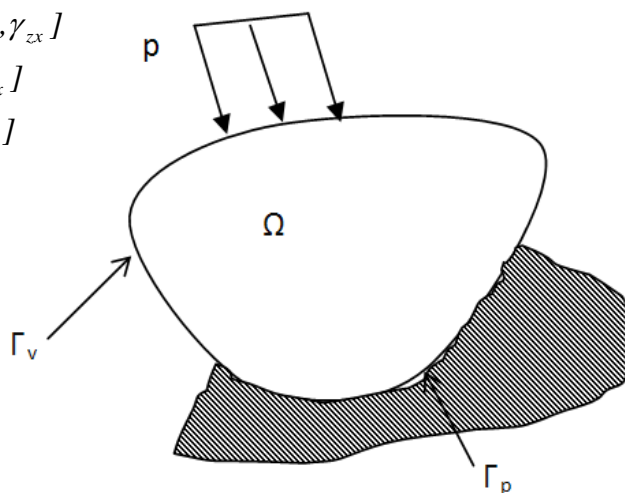
posuvů -  $u^T = [u, v, w]$

přetvoření -  $\varepsilon^T = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}]$

napětí -  $\sigma^T = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}]$

objemové zatížení -  $o^T = [o_x, o_y, o_z]$

plošné zatížení -  $p^T = [p_x, p_y, p_z]$

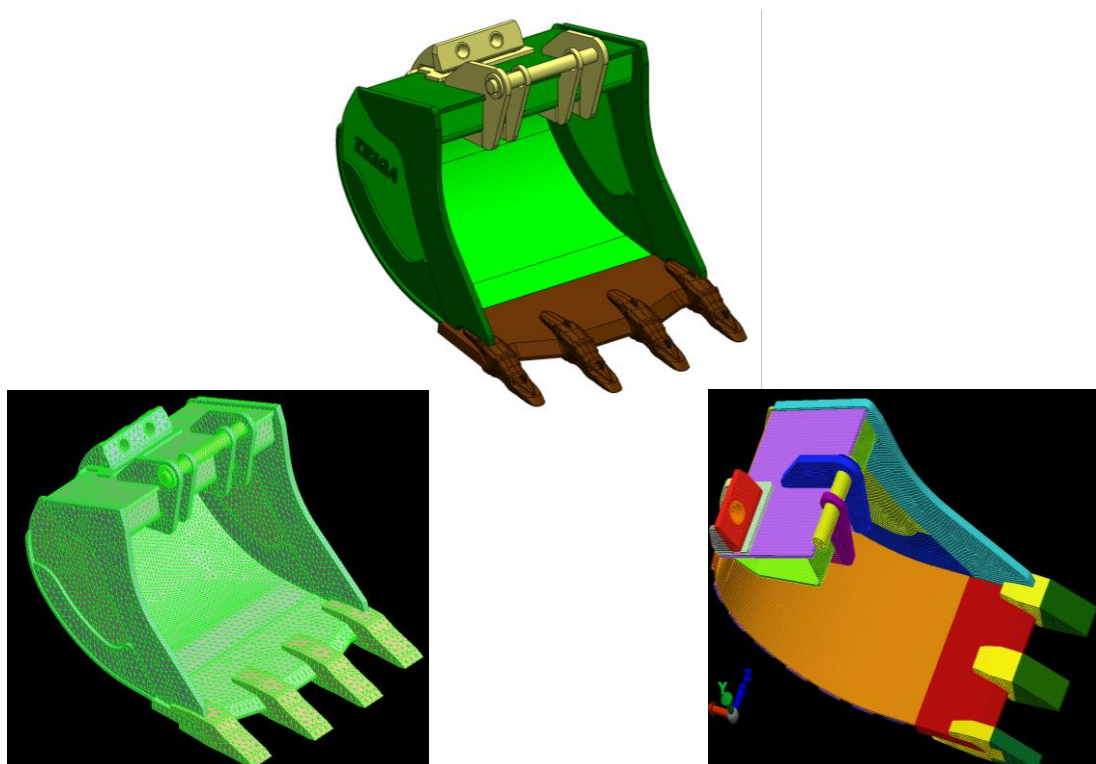


Obr. 2.14: Schéma zatížení a uložení tělesa

#### 2.4.2 Využití MKP [9]

MKP je numerická metoda, která našla s rozvojem výpočetní techniky uplatnění v mnoha oborech při vývoji a optimalizacích produktů. Využívá se hlavně pro posouzení stability a bezpečnosti navrhovaných konstrukcí při statických nebo dynamických dějích. Metoda se také nechá využít pro posouzení tepelně či povrchově namáhaných

konstrukcí, při kontaktních problémech (např. zatížení pístu v motoru, kontaktní napětí mezi brzdovou destičkou a kotoučem, atd.). Uplatnění našla i při simulaci nárazových zkoušek automobilů, kdy dochází k plastickým deformacím např. porušení konstrukce karosérie. V neposlední řadě nám umožňuje detailní popis mechanických vlastností materiálů při ohýbání, natahování, kroucení, či tváření, které nelze získat měřením. Pomocí MKP simulací se také snižuje doba od původního návrhu k finálnímu výrobku. Princip MKP spočívá v tom, že součást, která má kontinuální (spojitý) tvar se diskretizuje sítí skládající se z konečného počtu elementů, které lze rozdělit podle typu a náročnosti úlohy na 1D, 2D, 3D elementy. Tím, že se spojitě prostředí diskretizuje, je simulační model více či méně zjednodušený. Zjednodušení se především využívají pro časové urychlení výpočtu, např. zavedením rovin symetrie, zanedbáním malých geometrických tvarů, rádiusů, atd. nebo částí, které při posuzování nejsou důležité (tam kde je „předpoklad“ minimálního porušení). Při posuzování finálních výrobků, jako je např. životnost podkopové lžíce zatížené rypnými silami, které působí, při pracovním procesu, se v současnosti nejvíce využívají objemové (3D) elementy tzv. Tetrahedrony (čtyřstěny) nebo Bricky (osmistěny), jak je znázorněno na obr. 2.15.



Obr. 2.15: 3D Návrh konstrukce lžíce (nahore), MKP model s použitím 3D prvků Tetrahedron(vlevo), MKP model s použitím 3D prvků Brick (vpravo)

V současnosti se programy podle metody konečných prvků rozdělují na softwarové balíky, které umožňují řešit statické a dynamické děje, proudění, přestupy tepla, atd. Mezi nejvýznamnější patří programy Ansys, Abaqus, LS-Dyna, Algor, Comsol a speciální programy, které umožňují řešit jen specifickou oblast. Jsou to programy pro tváření (simulace tváření za tepla, za studena), crash testy, atd., mezi které patří programy Marc/Autoforge, Deform, Pam Crash, Pam Stamp. Modelovou simulací nikdy nedocílíme 100% správných výsledků, ale lze se reálnému měření nebo analytickému výpočtu přiblížit. Chyby výpočtů jsou u statických zkoušek minimální (cca do 5% při odpovídajících vstupních parametrech), ale u dynamických a nelineárních úloh se může považovat výsledek s chybou 15% za dobré řešení. Je to dáno také výběrem softwaru, kde je nutné zohlednit některé základní kritéria a to:

- poměr cena / výkon,
- dostupnost softwaru,
- náročnost na obsluhu,
- doba přípravy dat,
- doba výpočtu,
- kompatibilita s dalšími programy např. návaznost na CAD, CAM.

### 3 Experimentální část

Diplomová práce byla zadána a vypracována podle požadavků firmy TRIGA-MF spol. s r.o., která se dlouhodobě zabývá výrobou přídatných zařízení pro stavební a demoliční stroje. Tato přídatná zařízení jsou používána v těžkých podmínkách, ve kterých jsou vystaveny velkým rázům. Každý nový výrobek prochází před zahájením výroby kontrolou pomocí metody konečných prvků. Vstupní hodnoty pro výpočty jsou použity z materiálových listů. Takto prověřené výrobky odolávají těžkým podmínkám. I přesto se v několika málo případech, zvláště v zimních měsících, stalo, že se na výrobku při používání vytvořily trhliny (obr. 3.1). Proto byl následně reklamován.



Obr. 3.1: Příklad trhlin na výrobku

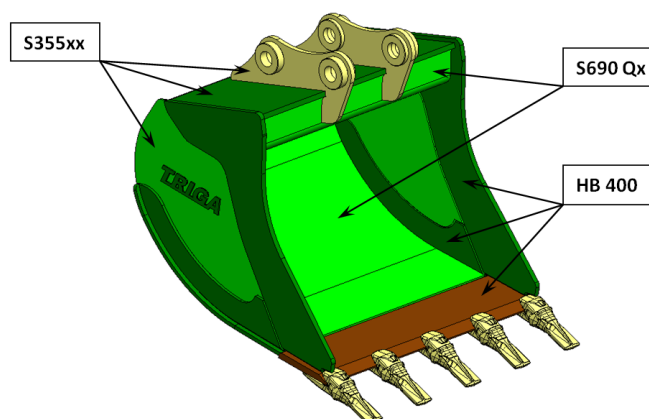
Tyto trhliny se vyskytují zcela výjimečně a za stále stejných podmínek. Není znám důvod jejich vzniku. Výrobky byly reklamovány v zimních měsících, proto se teplota pod bodem mrazu jevila jako nejpravděpodobnější příčina.

Cílem této diplomové práce bylo zjistit, jestli mají teploty pod bodem mrazu výrazný vliv na mechanické vlastnosti a zda byly příčinou vzniku trhlin na výrobcích. V průběhu řešení této práce byly zkoumány tři druhy materiálů, při čtyřech různých teplotách. Teplota byla zvolena podle prostředí, v kterém přídavná zařízení v praxi pracují. Jedná se o anizotropní materiály, proto byly testy voleny ve směru válcování a kolmo na směr válcování plechu. Pro zjištění mechanických hodnot byla použita zkouška tahem, zkouška tvrdosti dle Brinella a zkouška vrubové houževnatosti.

Výsledné hodnoty z těchto zkoušek mají ukázat, jak se materiály chovají v závislosti na klesající teplotě a pomocí nich rozhodnout, jestli to je hlavní důvod vzniku trhlin na výrobcích. Dále se mají naměřené hodnoty pokusit zpřesnit pevnostní výpočty v prostředí MKP, které by mohly umožnit lepší návrh tloušťky a jakosti materiálu a tím zlepšit kvalitu a případně cenu výrobků.

### 3.1 Zvolení materiálů a rozsahu teplot

Jakosti materiálů byly zvoleny na základě požadavků firmy Triga-MF, která je vybrala podle největšího využití ve svém výrobním programu. Jednalo se o tyto tři druhy materiálů: materiál S355xx podle normy EN 10025-2, materiál S690 Qx podle normy EN 10025-6 a materiál typu HB 400, který není značen dle normy, ale podle výrobce. Tyto materiály mají rozdílné technologické, i mechanické vlastnosti, jejich hlavní a důležitou vlastností pro výrobní proces je zaručená svařitelnost. Pro tuto vlastnost jsou právě používány a jejich kombinací jsou docíleny potřebné mechanické vlastnosti výrobku, to je vysoká pevnost, otěruvzdornost, ale také houževnatost. Na obr. 3.2 je názorně ukázáno jejich použití.



Obr. 3.2: Ukázka použití materiálů

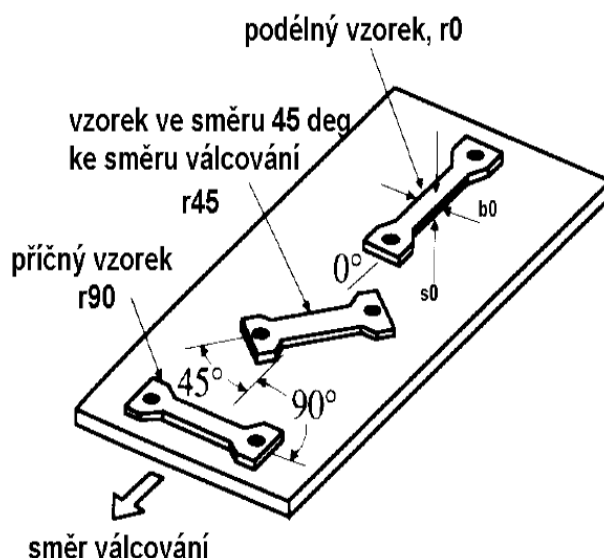
Materiál S355xx je základní prvek, který je užíván pro konstrukci přídavných zařízení. Jeho mechanické vlastnosti jsou vyhovující hlavně pro části výrobků, které nejsou vystaveny velkým namáháním a nadměrnému abrazivnímu opotřebení. Dobře se tvaruje, obrábí a také cena je příznivá.

Materiál S690Qx se používá pouze pro části přídavných zařízení, která jsou vystavena většímu mechanickému namáhání a při výrobě jsou potřeba tvarovat nebo obrábět. Technologické vlastnosti jsou velice podobné jako u S355xx, ale mechanické vlastnosti jsou výrazně lepší. Jedná se hlavně o pevnost a vrubovou houževnatost.

Materiál typu HB 400 má nejlepší mechanické, ale horší technologické vlastnosti. Nejdůležitější vlastností materiálu je otěruvzdornost, proto se používá na těch částech výrobků, které jsou vystaveny extrémnímu otěru abrazivními materiály. Nevýhodou materiálu je, že se může ohýbat pouze za podmínek s určitým omezením a také se díky tvrdosti hůře obrábí, než ostatní zmíněné materiály. Tyto nevýhody brání využití výborných mechanických vlastností i pro jiné konstrukční části přídavných zařízení.

Tyto materiály jsou dodávány jako plechy od více firem, v závislosti na ceně a dostupnosti, proto se může jakost plechů lišit. Podle informací z firemních zdrojů bylo zjištěno, že jsou nejčastěji dodávány plechy s jakostí S355J2 podle normy EN 10025-2, S690 QL dle normy EN 10025-6 a Dillidur 400 V, proto byly tyto materiály použity pro výrobu experimentálních vzorků.

Při výrobě vzorků byla uvažována také anizotropie materiálu, která je způsobena válcováním plechu. Směr válcování ovlivňuje mechanické vlastnosti tak, že po směru válcování jsou tyto vlastnosti lepší než kolmo na něj. Obecně jsou zkoušky prováděny na vzorcích odebraných ve třech směrech válcování (0°-po směru válcování, 45° na směr válcování a 90° na směr válcování – obr. 3.3).



Obr. 3.3: Odebrání vzorků podle směru válcování

Pro tento experiment byly zvoleny pouze směry dva. Při tvorbě řezacího plánu se z hlediska spotřeby materiálu umisťují na plech šablony budoucího výrobku buď po směru válcování ( $0^\circ$ ) nebo kolmo na něj ( $90^\circ$ ), nikdy pod  $45^\circ$ . V těchto dvou směrech je také největší rozdíl v mechanických vlastnostech, který je dostačující pro posouzení chování materiálů. Proto byly zvoleny právě tyto dva směry v  $0^\circ$  a v  $90^\circ$  na směr válcování.

Teploty pro testování byly zvoleny  $20^\circ\text{C}$ ,  $0^\circ\text{C}$ ,  $-15^\circ\text{C}$  a  $-30^\circ\text{C}$  podle prostředí, ve kterém výrobky v praxi pracují. Teplota  $20^\circ\text{C}$  je pro většinu zkoušek udávaná v normě jako zkušební teplota a jsou při ní měřeny mechanické vlastnosti, které jsou uváděny v materiálových listech.  $0^\circ\text{C}$  je přechodová teplota mezi kladnými a zápornými hodnotami teploty a měly by se zde projevit první změny mechanických vlastností materiálů.  $-15^\circ\text{C}$  je běžná zimní teplota v našich podmínkách a  $-30^\circ\text{C}$  byla zvolena jako kritická teplota, která je jen zřídka překonána.

### 3.1.1 Materiál S355xx dle EN 10025-2 [10], [11]

Materiál S355xx je nelegovaná konstrukční jemnozrnná jakostní ocel vhodná ke svařování. Chemickým složením a mechanickými vlastnostmi je podobný oceli 11 523. Maximální obsah C musí být 0,22%, aby byla zaručena svařitelnost. Další předepsané

prvky jsou P, S, u kterých je stanovena horní hranice, dále například Mn, Si pro substituční zpevnění. V tab. 3.1 jsou přehledně uvedeny vybrané druhy materiálů S355xx, jejich mechanické vlastnosti, množství přísad a vysvětlivky označení. Tyto materiály se obecně používají pro staticky nebo dynamicky namáhané svařované konstrukce a strojní části, u kterých je kladen nárok na vyšší mez kluzu. Vyrábějí se z něho např. plechy, tyče, trubky, dráty, atd., které jsou pak užity na výrobu součástí strojů, automobilů, motocyklů, tepelných zařízení a tlakových nádob.

Tab. 3.1: Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálů

| Označení materiálu: | $R_e$ [Mpa]                                          | $R_m$ [Mpa] | $A_{50mm}$ [%] | KV [J] | Teplota pro KV [°C] | $\leq C$ [%]                      | $\leq Si$ [%] | $\leq Mn$ [%] | $\leq P$ [%] | $\leq S$ [%] | $\leq N$ [%] | $\leq Cu$ [%] |
|---------------------|------------------------------------------------------|-------------|----------------|--------|---------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| S355JR              | 345-355                                              | 470-680     | 20             | 27     | 20                  | 0,2                               | 0,55          | 1,6           | 0,035        | 0,035        | 0,01         | 0,6           |
| S355J0              | 345-355                                              | 470-680     | 20             | 27     | 0                   | 0,2                               | 0,55          | 1,6           | 0,03         | 0,03         | 0,01         | 0,6           |
| S355J2+N            | 345-355                                              | 470-680     | 20             | 27     | -20                 | 0,2                               | 0,55          | 1,6           | 0,035        | 0,035        | -            | -             |
| Vysvětlivky:        | S – Konstrukční oceli                                |             |                |        |                     | JR - Nárazová práce 27J při 20°C  |               |               |              |              |              |               |
|                     | J0 - Nárazová práce 27J při 0°C                      |             |                |        |                     | J2 - Nárazová práce 27J při -20°C |               |               |              |              |              |               |
|                     | N - Normalizačně žhánáno nebo normalizačně válcováno |             |                |        |                     |                                   |               |               |              |              |              |               |

Značení materiálů se může lišit podle země, kde se materiál vyrábí nebo zpracovává a je řízeno příslušnou normou. Tato odlišná značení jsou uvedena v tab. 3.2.

Tab. 3.2: Způsob značení materiálů dle normy

| Užití:    | Evropa     | D         | Materiál no. | F          | I        | GB      | USA          |
|-----------|------------|-----------|--------------|------------|----------|---------|--------------|
| Norma:    | EN 10025-2 | DIN 17100 |              | NFA 35-501 | UNI 7070 | BS 4360 | ASTM         |
| Materiál: | S355JR     | -         | 1.0045       | E 36-2     | Fe 510 B | 50B     | A 678 GR. A  |
|           | S355J0     | St 523 U  | 1.0553       | E 36-3     | Fe 510 C | 50C     | -            |
|           | S355J2+N   | St 52-3 N | 1.0577       | -          | Fe 510 D | 50D     | A 573 GR. 70 |



### 3.1.2 Materiál S690 Qx dle EN 10025-6 [10], [12]

Materiál S690 Qx je legovaná, ušlechtilá, jemnozrnná konstrukční ocel s vysokou mezí kluzu. Ocel byla navržena tak, aby její chemické složení a mechanické vlastnosti poskytovaly vynikající svařitelnost a ohebnost. Během zpracování je kalena a následně popouštěna. Má dobrou vrubovou houževnatost, která je zaručena minimálními hodnotami nárazové práce od teploty  $-20^{\circ}\text{C}$ . Tento materiál se vyrábí se zaručenými hodnotami nárazové práce také pro nižší teploty pod odlišným označením. V tab. 3.3 jsou uvedeny tyto jednotlivé materiály s jejich mechanickými vlastnostmi a chemickým složením.

Tab. 3.3: Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálů

| Označení materiálu: | $R_e$ [Mpa]                      |         | $R_m$ [Mpa] |        | $A_{50mm}$ [%] | KV [J]                                   |         | Teplota pro KV [°C] |         | ≤P [%]  |         | ≤S [%] |         |
|---------------------|----------------------------------|---------|-------------|--------|----------------|------------------------------------------|---------|---------------------|---------|---------|---------|--------|---------|
| S690 Q              | 630-690                          |         | 710-940     |        | 14             | 27                                       |         | -20                 |         | 0,025   |         | 0,015  |         |
| S690 QL             | 630-690                          |         | 710-940     |        | 14             | 27                                       |         | -40                 |         | 0,02    |         | 0,01   |         |
| S690 QL1            | 630-690                          |         | 710-940     |        | 14             | 27                                       |         | -60                 |         | 0,02    |         | 0,01   |         |
| Společné prvky:     | ≤C [%]                           | ≤Si [%] | ≤Mn [%]     | ≤N [%] | ≤B [%]         | ≤Cr [%]                                  | ≤Cu [%] | ≤Mo [%]             | ≤Nb [%] | ≤Ni [%] | ≤Ti [%] | ≤V [%] | ≤Zr [%] |
| Množství:           | 0,2                              | 0,8     | 1,7         | 0,015  | 0,005          | 1,5                                      | 0,5     | 0,7                 | 0,06    | 2       | 0,05    | 0,12   | 0,15    |
| Vysvětlivky:        | S - Konstrukční oceli            |         |             |        |                | Q – Kalení a popouštění během zpracování |         |                     |         |         |         |        |         |
|                     | L - Nárazová práce 27J při -40°C |         |             |        |                | L1 - Nárazová práce 27J při -60°C        |         |                     |         |         |         |        |         |

Pro jeho velkou pevnost umožňuje navrhovat konstrukce lehčí, trvanlivější a odolnější a tím zlepšovat energetickou účinnost. Ocel je vhodná pro vysoce namáhané svařované konstrukce pracující za normálních i nízkých teplot, např.: mosty, zásobníky, nádrže na vodu, stavební stroje, atd.

Značení materiálů může být odlišné podle výrobce nebo země, kde se materiál vyrábí nebo zpracovává. Příklad značení dle normy nebo výrobce je uvedeno v tab. 3.4.

Tab. 3.4: Způsob značení materiálů dle normy a výrobce

| Značení dle: | EN<br>10025-6 | DIN 17100  | Material<br>no. | Výrobce:               | Dillinger<br>hütte GTS | SSAB           | RUUKKI          |
|--------------|---------------|------------|-----------------|------------------------|------------------------|----------------|-----------------|
| Materiál:    | S690 Q        | StE 690 V  | 1.8931          | Označení<br>materiálu: | Dillimax<br>690 B      | Weldox<br>700D | -               |
|              | S690 QL       | TStE 690 V | 1.8928          |                        | Dillimax<br>690 T      | Weldox<br>700E | Optim<br>700 QL |
|              | S690 QL1      | ESTe 690 V | 1.8988          |                        | Dillimax<br>690 E      | Weldox<br>700E | -               |

### 3.1.3 Materiál typu HB 400 [13]. [14]. [15]

Materiály typu HB 400 jsou vysokopevnostní kalené ocele odolné proti opotřebení s nízkým obsahem uhlíku a legujících prvků tak, aby při vysokých hodnotách pevnosti a tvrdosti byly zajištěny jejich poměrně dobré technologické vlastnosti, zejména svařitelnost. Tvrdost materiálů se dosahuje účinným kalením ve vodě nebo v oleji na kalicí lince. Po kalení se již nepopouštějí nebo se popouštějí pouze na nízké teploty (cca 200°C), proto mají vysokou tvrdost i přesto, že v oceli je málo legujících prvků. Jsou to univerzální otěruvzdorné ocele, které splňují náročná kritéria pro výrobu a použití v extrémních i běžných podmínkách. Kombinace vysoké tvrdosti, pevnosti a dobré houževnatosti představuje optimální řešení pro použití tam, kde příčinou opotřebení bývá otěr.

Jejich použitím můžeme prodloužit životnost strojních zařízení, snížit opotřebení konstrukčních dílů a tím ušetřit případné náklady na opravy. Používají se při výrobě lžic bagrů, nakladačů, koreb nákladních aut, drtičů a mlýnů. Tyto materiály nemají žádné označení podle norem, proto má každý výrobce svůj obchodní název. Protože neexistuje norma, která by stanovila přesně mechanické vlastnosti a chemické složení, mohou se tyto hodnoty podle výrobce lišit. Viz tab. 3.5.

Tab. 3.5: Porovnání mechanických vlastností a chemického složení materiálů jednotlivých výrobců

| Výrobce:            | Obchodní označení: | Tvrdost [HBW] | $R_e$ [MPa] | $R_m$ [MPa] | $A_{50mm}$ [%] | KV [J] | Teplota pro KV [°C] |         |         |        |        |         |
|---------------------|--------------------|---------------|-------------|-------------|----------------|--------|---------------------|---------|---------|--------|--------|---------|
| SSAB                | Hardox 400         | 370 - 430     | 1000        | 1250        | 12             | 45     | -40                 |         |         |        |        |         |
| Dillinger hütte GTS | Dillidur 400 V     | 370 - 430     | 1000        | 1300        | 12             | 30     | -40                 |         |         |        |        |         |
| RUUKKI              | Raex 400           | 360 - 440     | 1000        | 1250        | 10             | 20     | -40                 |         |         |        |        |         |
| Duferco             | Quard 400          | 370 - 430     | 1050        | 1250        | 10             | 30     | -40                 |         |         |        |        |         |
|                     |                    |               |             |             |                |        |                     |         |         |        |        |         |
|                     | Obchodní označení: | ≤C [%]        | ≤Si [%]     | ≤Mn [%]     | ≤P [%]         | ≤S [%] | ≤Cr [%]             | ≤Ni [%] | ≤Mo [%] | ≤B [%] | ≤V [%] | ≤Nb [%] |
|                     | Hardox 400         | 0,18          | 0,7         | 1,6         | 0,025          | 0,01   | 1                   | 0,25    | 0,25    | 0,004  | -      | -       |
|                     | Dillidur 400 V     | 0,2           | 0,5         | 1,8         | 0,025          | 0,01   | 1,5                 | 0,8     | 0,5     | 0,005  | 0,08   | 0,05    |
|                     | Raex 400           | 0,25          | 0,8         | 1,7         | 0,025          | 0,015  | 1,5                 | 1       | 0,5     | 0,005  | -      | -       |
|                     | Quard 400          | 0,16          | 0,7         | 1,6         | 0,025          | 0,01   | 0,5                 | 0,25    | 0,25    | 0,005  | -      | -       |

### 3.2 Příprava vzorků pro experiment

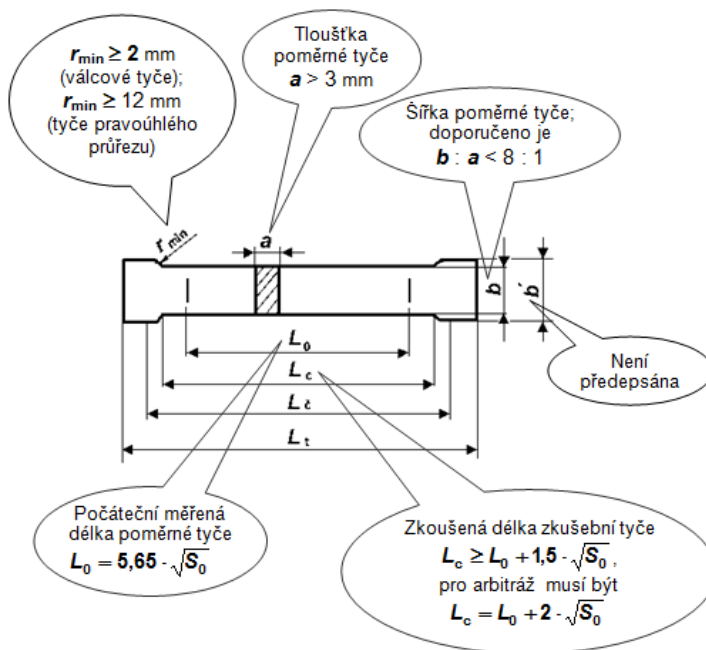
Nedílnou součástí experimentu je příprava vzorků. Vzhledem k velkému počtu kombinací (typ materiálu, směr válcování, teplota) byla výroba vzorků poměrně náročná. Pro jednotlivé zkoušky za různých podmínek bylo třeba vyrobit minimálně 5 ks vzorků, aby naměřené hodnoty z experimentů byly adekvátní. Pro případ náhodného selhání měření nebo přílišné odlišnosti výsledné hodnoty bylo vyrobeno pro možnost opakování experimentu 6ks těchto vzorků. Celkový počet vzorků tedy dosáhl počtu 291 kusů.

#### Zkušební tyč pro zkoušku tahem

Zkouška tahem je jedna z nejdůležitějších a nejpoužívanějších zkoušek pro zjištění základních mechanických vlastností materiálů. Před vlastním experimentálním měřením se musí vyrobit zkušební tyče, které rozhodují podle jejich kvality zpracování o přesnosti výsledných hodnot.

## Výroba zkušebních tyčí

Zkušební tyč byla navržena podle předpisu pro plechy a ploché výrobky o tloušťce  $a > 3,0$  (obr. 3.4) dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Rozměry tyčí byly z velké části závislé na zkušebním zařízení, které bylo omezeno maximální tahovou silou 100kN. Minimální tloušťka plechu, která se užívá ve firmě Triga-MF je  $a=6\text{mm}$  a největší mez



Obr. 3.4: Návrh zkušební tyče pro plechy a ploché výrobky o tloušťce  $a > 3,0$

pevnosti z testovaných materiálů je  $R_m=1300\text{MPa}$ . Pomocí těchto tří hodnot a vzorce (3.1) byla vypočítána s rezervou přibližně 20kN maximální šířka  $b=10\text{mm}$  a z ní byly dopočítány další potřebné rozměry z obr. 3.4.

$$R_m = \frac{F}{S} \text{ [MPa]} \quad (3.1)$$

Kde:  $R_m$  ... Mez pevnosti [MPa]

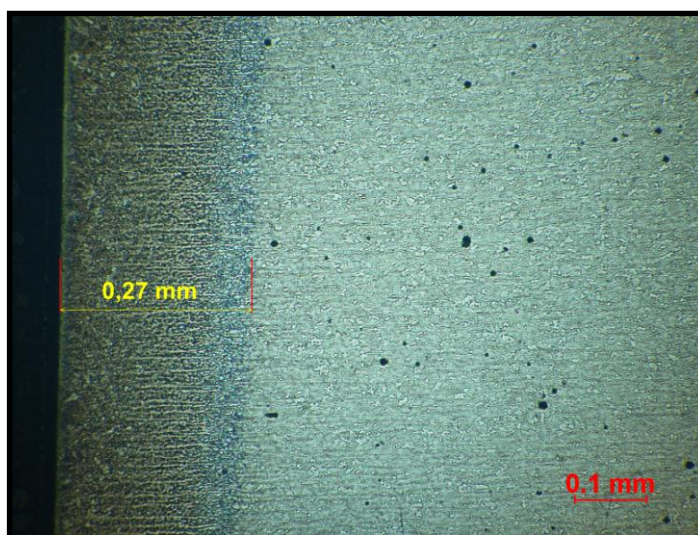
$F$  ... Síla [N]

$S$  ... Průřez [ $\text{mm}^2$ ]

Výrobní postup byl volen podle možností firmy, proto byly zkušební tyče nejdříve vyřezány plazmovým paprskem a poté obráběny na CNC stroji. Před zhotovením všech tyčí byla vyřezána jedna zkušební, na které se změřila velikost

podřezu a teplem ovlivněná oblast. I přes seřízení stroje a výměnu řezací trysky, byl podřez v rozmezí 0,5mm až 0,75mm na stranu a tvar kontury byl dodržen v toleranci  $\pm 1$ mm. Tolerance tvaru a podřez je o něco větší než u nových moderních strojů, ale pro potřeby firmy je takto zhotovený polotovár dostačující.

Teplo, které je vneseno při řezání do vzorků, ovlivňuje určitou oblast a má vliv na mechanické vlastnosti a strukturu materiálu. Tato oblast se nazývá teplem ovlivněná oblast (TOO) a je nutné jí odstranit, aby nedošlo při zkoušce k ovlivnění výsledných hodnot. TOO se mění v závislosti na tloušťce materiálu, rychlosti řezání a velikosti proudu. Vzhledem k tomu, že není dostupná literatura, podle které by se dala určit TOO, byla odebrána část z prvního vzorku a z ní byl proveden metalografický výbrus. Na obr. 3.5 je vidět pásmo ovlivněné oblasti, které dosahuje rozměru 0,27mm. Výbrus byl udělán normalizovaným způsobem za použití látky Nital pro naleptání.



Obr. 3.5: Teplem ovlivněná oblast vzorku řezaného plazmou

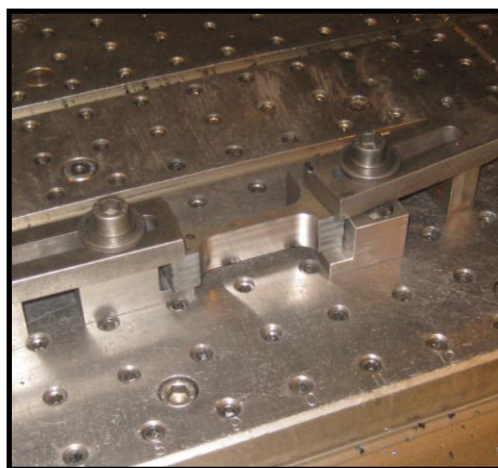
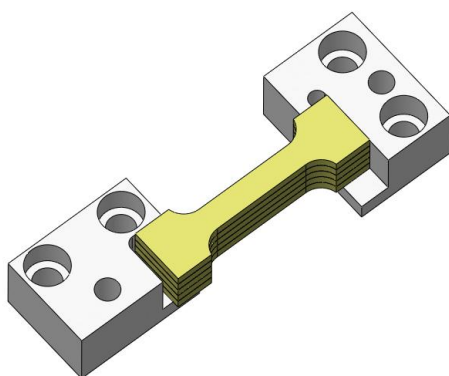
S přihlédnutím k maximálnímu podřezu, vrchní toleranci tvaru kontury a TOO, musí být zkušební tyč široká minimálně 14,04mm. Aby nebyly vlastnosti tyče zaručeně ovlivněny, byla zvolena její šířka 15mm. Výrobní výkresy tyčí jsou umístěny v příloze.

Po zvolení správné šířky se vyřezaly všechny polotovary zkušebních tyčí potřebné pro zkoušku. Protože jsou zkušební vzorky řezány z různých materiálů ve dvou směrech natočení vzhledem k válcování plechu, bylo potřeba důkladně tyto vzorky oddělit a označit, aby nedošlo k jejich záměně. V tab. 3.6 je uvedeno rozdělení a množství zkušebních tyčí podle druhu materiálů a podmínek zkoušení.

Tab. 3.6: Rozdělení a množství vzorků dle podmínek zkoušení

| Druh materiálu           | Směr válcování | Teplota[°C]:     |   |     |     |
|--------------------------|----------------|------------------|---|-----|-----|
|                          |                | 20               | 0 | -15 | -30 |
|                          |                | Počet kusů: [ks] |   |     |     |
| S355J2                   | 0°             | 6                | 6 | 6   | 6   |
|                          | 90°            | 6                | 6 | 6   | 6   |
| S690 QL                  | 0°             | 6                | 6 | 6   | 6   |
|                          | 90°            | 6                | 6 | 6   | 6   |
| Dillidur 400 V           | 0°             | 6                | 6 | 6   | 6   |
|                          | 90°            | 6                | 6 | 6   | 6   |
| Celkový počet kusů: [ks] |                | 144              |   |     |     |

Před obráběním byly polotovary zkušebních tyčí očištěny od spáleného materiálu po řezání, tak aby se nechaly bezproblémově zakládat do předem vyrobeného jednoúčelového přípravku (obr. 3.6). Obráběcí přípravek byl vyroben z důvodu velkého vytížení CNC stroje a navržen pro obrábění 5ks zkušebních tyčí najednou. Jednoduché a rychlé zakládání polotovarů do přípravku a následná výměna hotových obrobků za polotovary bez nutnosti opakovaného hledání nulového bodu nebo doměřování potřebných vzdáleností ušetřilo nespočet času a tím i cenu opracování. Výrobní výkresy tohoto přípravku jsou umístěny v příloze.



Obr. 3.6: Založené zkušební tyče v jednoúčelovém obráběcím přípravku

Zkušební tyče byly na jedno upnutí nejprve obráběny hrubovací frézou a poté speciálním nástrojem načisto, který dokáže při nastavení optimálních řezných podmínek obrobit povrch na drsnost 0,8.

### **Zkušební vzorky pro zkoušku tvrdosti podle Brinella**

Zkouška tvrdosti podle Brinella dle normy ČSN EN ISO 6506-1 se obecně provádí na lesklých rovných plochách zkoušené součásti nebo vzorku. Takovéto plochy se většinou docílí broušením, které zbaví materiál okují, rzi a jiných nečistot, které by měly na měření negativní vliv.

Vzorky zkoušených materiálů byly řezány plazmou z tabulí plechů o tloušťce 10mm. Řezán byl pouze jeden vzorek z každého materiálu, ale velikost byla zvolena tak, aby se na tento formát vešly přehledně všechny vpichy pro každou zkoušenou teplotu. Vzorky byly očištěny a označeny z obou stran druhem materiálu. Nakonec byly výpalky připevněny pomocí magnetického stolu na brusku (obr. 3.7) a zbroušeny na požadovaný povrch.



Obr. 3.7: Broušení vzorků pro zkoušku tvrdosti podle Brinella

### **Zkušební tyče pro zkoušku vrubové houževnatosti**

Zkouška vrubové houževnatosti se provádí na zkušebních tyčích, které jsou dány normou této zkoušky. Norma ČSN EN 10045-1 udává přesné rozměry tyčí a připouští na nich dva typy vrubů, které mají tvar U nebo V (obr. 2.12 – Kapitola: 2.2.3 Zkouška rázem). Typ vrubu je volen podle domluvy se zadavatelem zkoušky, typu materiálu nebo výrobních možností firmy.

### **Výroba zkušebních tyčí**

Zkušební tyče se řezaly vodním paprskem v kvalitě Q1 z desek o rozměru 200 mm x 160 mm o tloušťce 10 mm. Tato technologie řezání byla zvolena, protože



neovlivňuje teplem místo řezu, podřez se drží v toleranci  $\pm 0,05\text{mm}$  a výsledná drsnost povrchu je 1,6. Proto se vzorek nemusí dále upravovat. Desky byly řezány plazmou zároveň se vzorky pro zkoušku tvrdosti, aby byly odebrány ze stejných tabulí plechů a také se ušetřil čas pro seřízení pálicího stroje a manipulaci s plechy. Řezány byly dvě desky z každého materiálu, které byly vůči sobě natočeny o  $90^\circ$  (po směru válcování plechu a kolmo na něj) a po vyjmutí ihned označeny, aby nedošlo k záměně.

Vzorky byly vyrobeny podle normy s průřezem  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  v délce  $55\text{mm}$  a opatřeny U-vrubem. Tento vrub byl zvolen z důvodu bezproblémové výroby zkušebních tyčí a na základě požadavku firmy, aby se v případě vzniku dalších trhlin na výrobku nechal vyrobiť vzorek stejným způsobem a výsledné hodnoty mohly být spolu porovnány. Výrobní výkresy vzorků jsou umístěny v příloze. Na obr. 3.8 je ukázán příklad desek z materiálu S690 QL s hotovými vzorky před jejich vyražením. Po vyražení se vzorky roztřídily podle materiálu, směru válcování a teploty zkoušení. Celkový počet kusů pro experiment byl volen stejným způsobem jako pro zkoušku tahem podle tab. 3.6.



Obr. 3.8: Ukázka desek z materiálu S690 QL s hotovými vzorky před vyražením

### 3.3 Použité zařízení pro zkoušky

Pro realizaci zkoušek byla použita zařízení, která má k dispozici TUL a jsou běžně používána pro praktické testování vzorků. Jednotlivá zařízení jsou rozdělena, podle zkoušek, na které byla použita. Laboratorní mraznička ProfiMaster PMU 0450 (obr. 3.9) je uvedena samostatně, protože díky svému teplotnímu rozsahu  $-10$  až  $-50^\circ\text{C}$  a objemu 35l, byla použita na temperaci vzorků pro všechny typy prováděných zkoušek.





Obr. 3.9: Laboratorní mraznička ProfiMaster PMU 0450

### Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem (obr. 3.10) byla provedena na stroji TIRA test 2300 (Poz. 1) s použitím programu Labtest 4.01 pro vyhodnocení naměřených dat. Na zkušební stroj byla připevněna temperační komora (Poz. 2), do které se přes táhla (Poz. 3) připevnilly čelisti (Poz. 4) pro uchycení zkušebních tyčí. Komora byla temperována tekutým argonem z Dewarovi nádoby (Poz. 5). Teplota byla řízena přístrojem Technologic THP 96 (Poz. 6), který kontroloval nastavenou hodnotu a podle ní reguloval přívod argonu.



Obr. 3.10: Trhací zařízení TIRA test 2300 s chladicí technikou

### **Zkouška tvrdosti**

Zkouška byla provedena univerzálním tvrdoměrem pro měření tvrdosti dle Brinella a Vickerse (obr. 3.11). Přístroj má vyměnitelné indentory a je na něm možno nastavit většinu normalizovaných zatížení. Vyhodnocení tvrdosti je ulehčeno a zpřesněno modernizací tvrdoměru, na kterém byl instalován měřicí systém s novým typem firewire kamery, jenž několikanásobně zvyšuje kvalitu snímaného obrazu vpichu.



Obr. 3.11: Univerzální stroj pro zkoušku tvrdosti podle Brinella a Vickerse

### **Zkouška vrubové houževnatosti**

Vrubová houževnatost byla zkoušena pomocí Charpyho kladiva WPM 423/27. Kinetická energie, kterou kladivo dokáže vyvodit, je 300 J.



Obr. 3.12: Charpyho kladivo pro zkoušku vrubové houževnatosti

### 3.4 Zjištění mechanických hodnot materiálů statickou zkouškou tahem

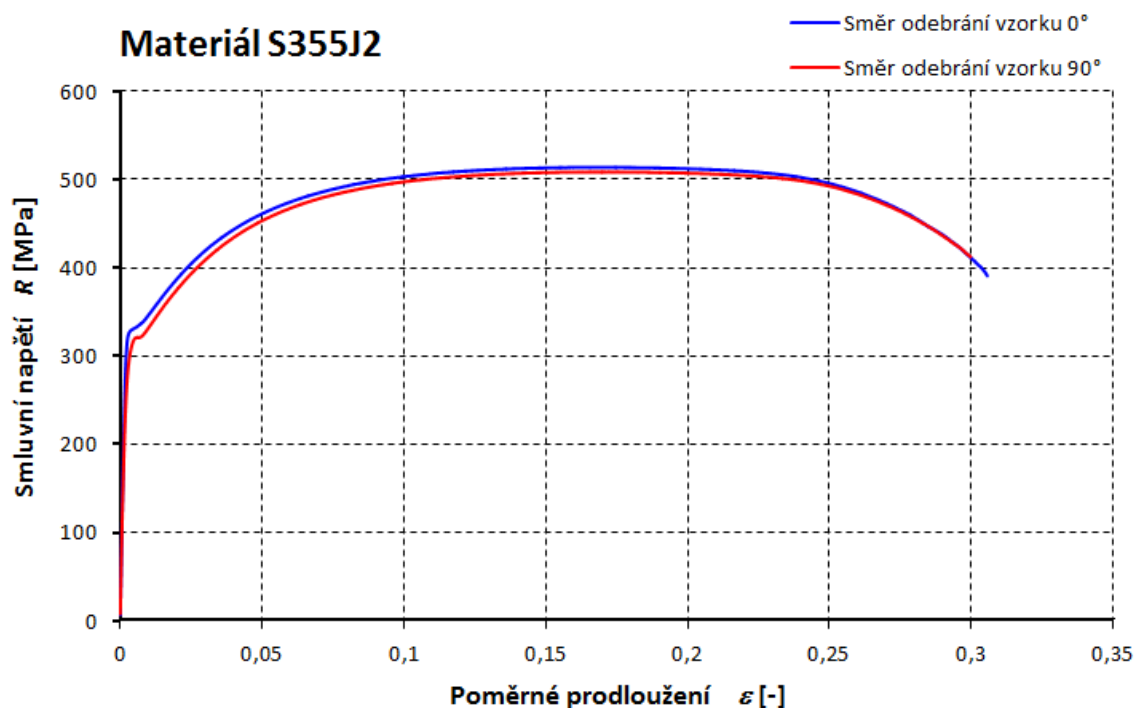
Mechanické hodnoty byly měřeny v závislosti na teplotě. Zkouška probíhala za rychlosti posuvu čelisti 10 mm/min. Před začátkem experimentu byly pro stanovení prodloužení na každý vzorek nanесeny rysky ve vzdálenosti 50mm od sebe. Nejdříve se zkouška provedla pro všechny materiály za teploty 20°C. Poté se postupně tyče zchlazovaly v laboratorní mrazničce s výdrží 30min na jednotlivé teploty 0°C, -15°C a -30°C. Zároveň se také nastavila stejná teplota pro temperační komoru. Když byly vzorky dostatečně zchlazeny, postupně se přidělavaly do čelistí a vždy se vyčkalo, než teplota v komoře dosáhne požadovaných hodnot. Před zahájením zkoušky se ještě 5 min počkalo, aby se zaručilo zchlazení vzorku v celém objemu. Po ukončení zkoušky byla přetržená zkušební tyč vyňata a změřena. Rozměr byl zadán do programu, který na jeho základě určil prodloužení. Pro každý materiál (3 druhy), s přihlédnutím na anizotropii (2 směry) a teplotu při zkoušce (4 teploty), se provedlo pět funkčních měření a z nich se stanovily průměrné mechanické hodnoty. Protokoly ze všech měření jsou umístěny v příloze.

Tab. 3.7: Mechanické hodnoty materiálů S355J2 při směru odebrání 0°

| Teplota [°C] | $R_{p0,2}$ [MPa] | Sm. odchylka $R_{p0,2}$ [MPa] | $R_m$ [MPa] | Sm. odchylka $R_m$ [MPa] | $A_{50mm}$ [%] | Sm. odchylka $A_{50mm}$ [%] |
|--------------|------------------|-------------------------------|-------------|--------------------------|----------------|-----------------------------|
| 20           | 320,2            | 2,4                           | 513,4       | 3,0                      | 30,57          | 0,35                        |
| 0            | 331,5            | 4,0                           | 515,2       | 6,9                      | 29,6           | 0,41                        |
| -15          | 336,3            | 3,4                           | 525         | 10,9                     | 28,81          | 0,55                        |
| -30          | 341,4            | 2,9                           | 529,4       | 4,2                      | 28,09          | 0,45                        |

Tab. 3.8: Mechanické hodnoty materiálů S355J2 při směru odebrání 90°

| Teplota [°C] | $R_{p0,2}$ [MPa] | Sm. odchylka $R_{p0,2}$ [MPa] | $R_m$ [MPa] | Sm. odchylka $R_m$ [MPa] | $A_{50mm}$ [%] | Sm. odchylka $A_{50mm}$ [%] |
|--------------|------------------|-------------------------------|-------------|--------------------------|----------------|-----------------------------|
| 20           | 316,8            | 2,2                           | 507,1       | 4,1                      | 29,97          | 0,52                        |
| 0            | 320,6            | 5,2                           | 512,5       | 4,8                      | 29,53          | 0,47                        |
| -15          | 326,6            | 3,9                           | 525,5       | 6,3                      | 28,93          | 0,4                         |
| -30          | 332              | 4,0                           | 532,9       | 6,4                      | 27,97          | 0,37                        |



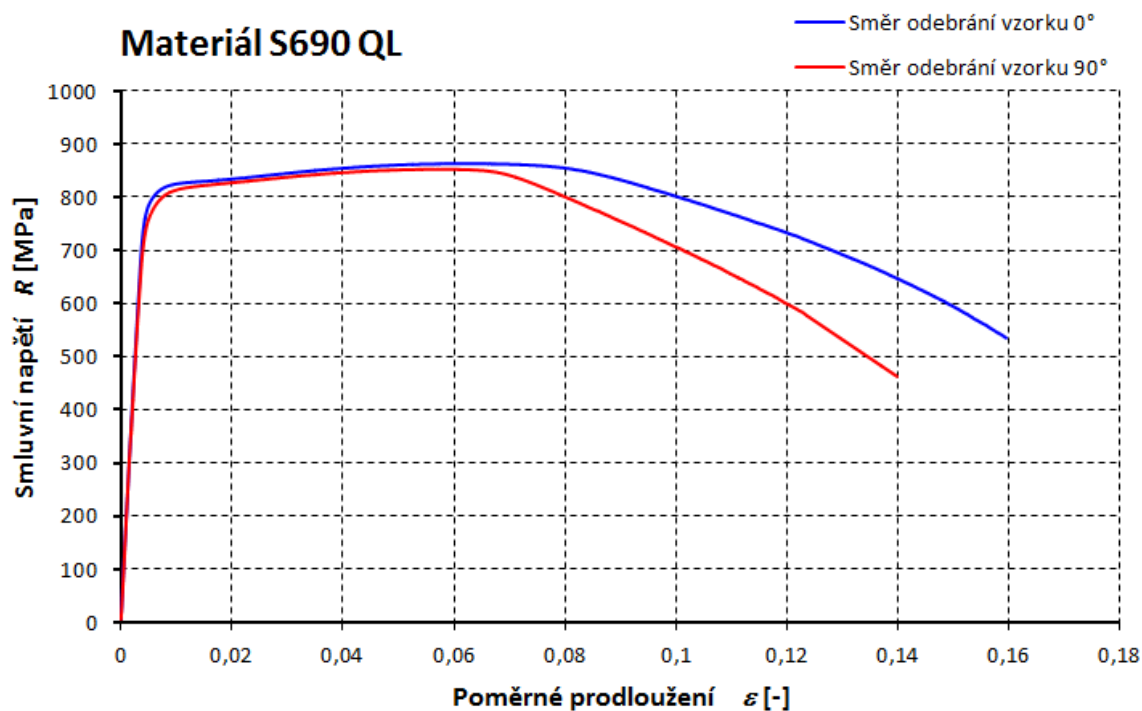
Obr. 3.14: Grafické porovnání mechanických vlastností materiálu S355J2 pro směr odebrání 0° a 90° při teplotě 20°C

Tab. 3.9: Mechanické hodnoty materiálů S690 QL při směru odebrání 0°

| Teplota [°C] | $R_{p0,2}$ [MPa] | Sm. odchylka $R_{p0,2}$ [MPa] | $R_m$ [MPa] | Sm. odchylka $R_m$ [MPa] | $A_{50mm}$ [%] | Sm. odchylka $A_{50mm}$ [%] |
|--------------|------------------|-------------------------------|-------------|--------------------------|----------------|-----------------------------|
| 20           | 797,6            | 6,5                           | 862,2       | 10,7                     | 15,95          | 0,06                        |
| 0            | 805,2            | 5,7                           | 865,7       | 9,2                      | 15,55          | 0,34                        |
| -15          | 808,7            | 2,6                           | 871         | 9,0                      | 15,07          | 0,32                        |
| -30          | 815,1            | 3,0                           | 876,6       | 9,9                      | 14,55          | 0,34                        |

Tab. 3.10: Mechanické hodnoty materiálů S690 QL při směru odebrání 90°

| Teplota [°C] | $R_{p0,2}$ [MPa] | Sm. odchylka $R_{p0,2}$ [MPa] | $R_m$ [MPa] | Sm. odchylka $R_m$ [MPa] | $A_{50mm}$ [%] | Sm. odchylka $A_{50mm}$ [%] |
|--------------|------------------|-------------------------------|-------------|--------------------------|----------------|-----------------------------|
| 20           | 772              | 5,9                           | 857,4       | 9,1                      | 13,93          | 0,49                        |
| 0            | 779,9            | 2,9                           | 857,9       | 11,7                     | 13,48          | 0,29                        |
| -15          | 786,2            | 4,7                           | 866,5       | 8,6                      | 12,81          | 0,33                        |
| -30          | 792,5            | 2,4                           | 868,2       | 8,9                      | 12,67          | 0,47                        |



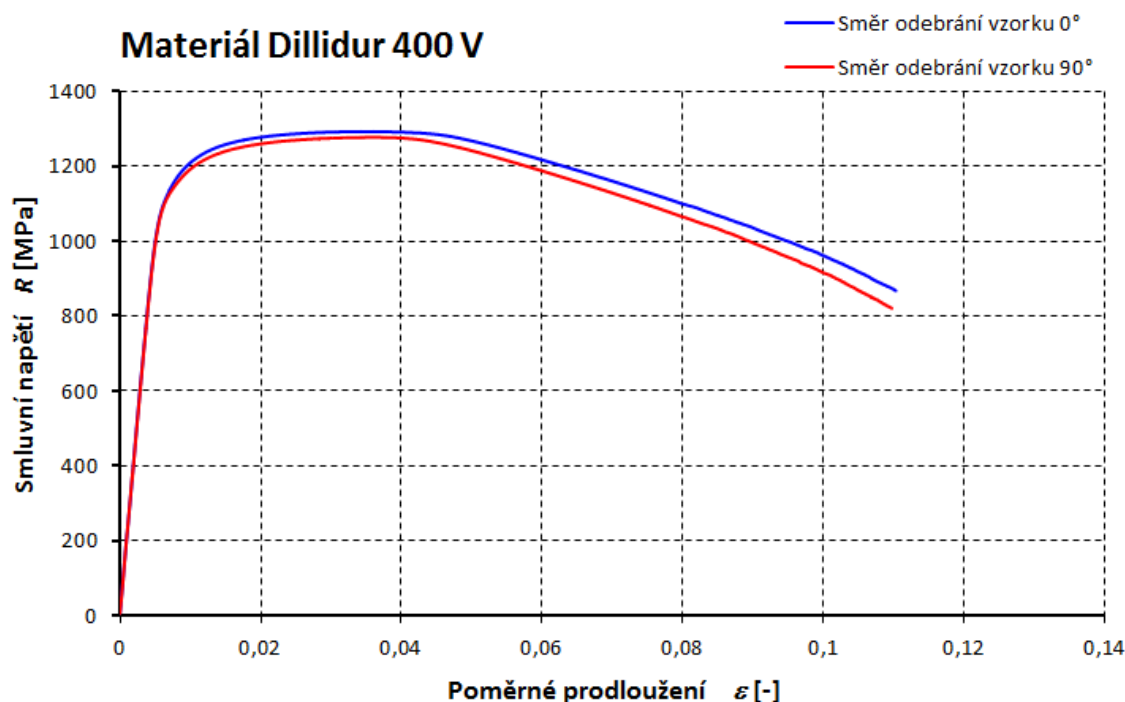
Obr. 3.15: Grafické porovnání mechanických vlastností materiálu S690 QL pro směr odebrání 0° a 90° při teplotě 20°C

Tab. 3.11: Mechanické hodnoty materiálů Dillidur 400 V při směru odebrání 0°

| Teplota [°C] | $R_{p0,2}$ [MPa] | Sm. odchylka $R_{p0,2}$ [MPa] | $R_m$ [MPa] | Sm. odchylka $R_m$ [MPa] | $A_{50mm}$ [%] | Sm. odchylka $A_{50mm}$ [%] |
|--------------|------------------|-------------------------------|-------------|--------------------------|----------------|-----------------------------|
| 20           | 1148,3           | 11,2                          | 1291,7      | 7,6                      | 11,02          | 0,32                        |
| 0            | 1160,9           | 4,7                           | 1296,6      | 6,0                      | 10,48          | 0,43                        |
| -15          | 1165,6           | 3,1                           | 1299,3      | 3,7                      | 10,17          | 0,26                        |
| -30          | 1175,6           | 5,2                           | 1308,2      | 7,4                      | 9,92           | 0,23                        |

Tab. 3.12: Mechanické hodnoty materiálů Dillidur 400 V při směru odebrání 90°

| Teplota [°C] | $R_{p0,2}$ [MPa] | Sm. odchylka $R_{p0,2}$ [MPa] | $R_m$ [MPa] | Sm. odchylka $R_m$ [MPa] | $A_{50mm}$ [%] | Sm. odchylka $A_{50mm}$ [%] |
|--------------|------------------|-------------------------------|-------------|--------------------------|----------------|-----------------------------|
| 20           | 1148,7           | 13,7                          | 1276,6      | 8,1                      | 10,97          | 0,25                        |
| 0            | 1155,5           | 14,9                          | 1283,8      | 3,9                      | 10,55          | 0,26                        |
| -15          | 1160,9           | 15,3                          | 1287,7      | 9,2                      | 10,21          | 0,22                        |
| -30          | 1170,2           | 5,2                           | 1295,4      | 7,4                      | 9,86           | 0,23                        |



Obr. 3.16: Grafické porovnání mechanických vlastností materiálu Dillidur 400 V pro směr odebrání 0° a 90° při teplotě 20°C

### 3.4.1 Diskuze výsledků ze statické zkoušky tahem

Z naměřených mechanických hodnot je patrné, že záporná teplota a anizotropie má mírný vliv na mez kluzu  $R_{p0,2}$ , mez pevnosti  $R_m$  a tažnost  $A_{50mm}$  materiálů. S klesající teplotou roste  $R_{p0,2}$  a  $R_m$ , ale zároveň klesá  $A_{50mm}$ . Anizotropie těchto plechů je nepatrná, ale z naměřených hodnot vyplývá, že po směru válcování mají lepší tažnost a přibližně stejnou nebo vyšší mez kluzu a mez pevnosti, než kolmo na směr válcování.

Zkouška při teplotě 20°C byla provedena pro kontrolu, zda jsou mechanické vlastnosti materiálů shodné s hodnotami uváděnými v materiálových listech. Mechanické vlastnosti materiálů S690 QL a Dillidur 400 V jsou totožné nebo vyšší, ale u materiálu S355J2 byla naměřena o 10% nižší mez kluzu a o 50% větší tažnost, proto je na dílech z tohoto materiálu větší riziko možnosti vzniku deformace.

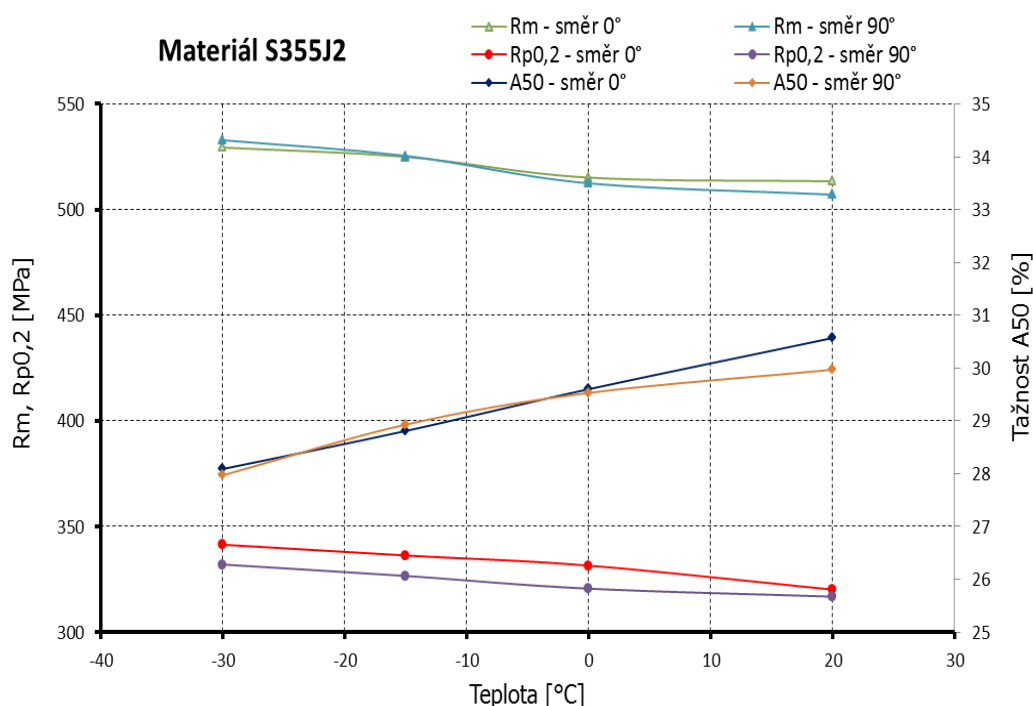
Rozdíl naměřených hodnot ( $R_{p0,2}$ ,  $R_m$  a  $A_{50mm}$ ) vzhledem ke směru odebrání vzorků (směr 0°, směr 90°) je maximálně 3%, což je téměř zanedbatelné, ale u materiálu S690 QL je patrné z obr. 3.18, že tažnost  $A_{50mm}$  je rozdílná o 15%. Malý

rozdíl mechanických hodnot vzhledem k anizotropii je nejspíš dán způsobem válcování plechů - za tepla. Rozdíl tažnosti o 15% u plechů z materiálu S690 QL může být způsoben odlišnou technologií výroby, při které se plech nejprve kalí a poté popouští.

Mez kluzu a mez pevnosti se u všech materiálů v závislosti na klesající teplotě změnila maximálně o 6%, což je z hlediska změny výsledku z MKP téměř zanedbatelné, ale v mezních situacích může napomoci k zvolení správné jakosti materiálu nebo tloušťky plechu.

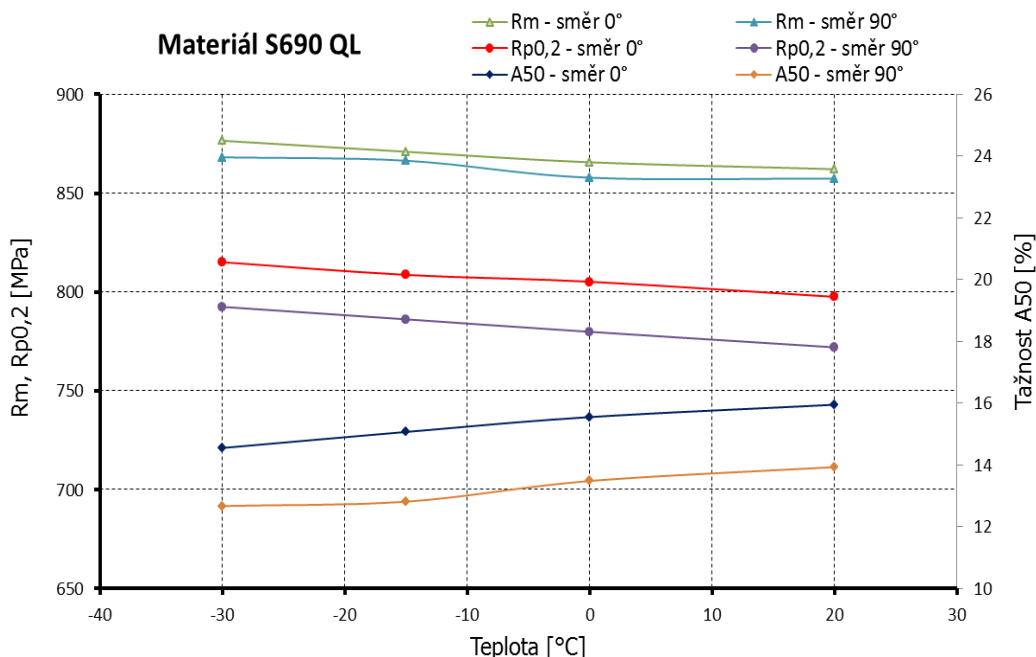
Tažnost v závislosti na teplotě klesala u materiálu S355J2 přibližně o 8,5%, u materiálu S690 QL přibližně o 10% a u materiálu Dillidur 400 V přibližně o 11%. Změna tažnosti v závislosti na teplotě je největší, ale z hlediska výpočtů v MKP není důležitá, protože neslouží jako vstupní parametr pro simulační výpočet.

Z průměrných hodnot pro jednotlivé teploty je níže na obr. 3.17 až 3.19 zobrazen pro každý materiál graf závislosti změny mechanických vlastností na teplotě.

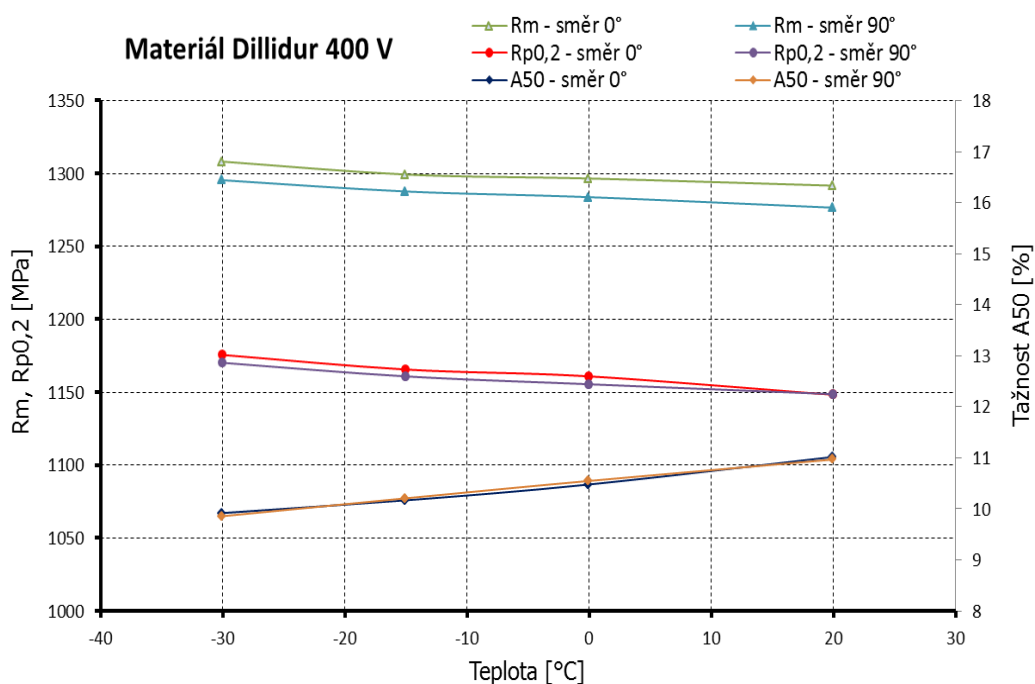


Obr. 3.17: Grafické vyjádření závislosti mechanických hodnot na teplotě a jejich porovnání dle směru odebrání vzorku pro materiál S355J2





Obr. 3.18: Grafické vyjádření závislosti mechanických hodnot na teplotě a jejich porovnání dle směru odebrání vzorku pro materiál S690 QL



Obr. 3.19: Grafické vyjádření závislosti mechanických hodnot na teplotě a jejich porovnání dle směru odebrání vzorku pro materiál Dillidur 400 V

### 3.5 Zjištění mechanických hodnot materiálů zkouškou tvrdosti

Tvrdost podle Brinella se měřila na předem vyrobených broušených deskách, které se zchladily v laboratorní mrazničce na požadovanou teplotu (20, 0, -15 a -30°C). Při změně teploty zkoušení se vždy vzorky nechaly temperovat cca 30min, aby byla

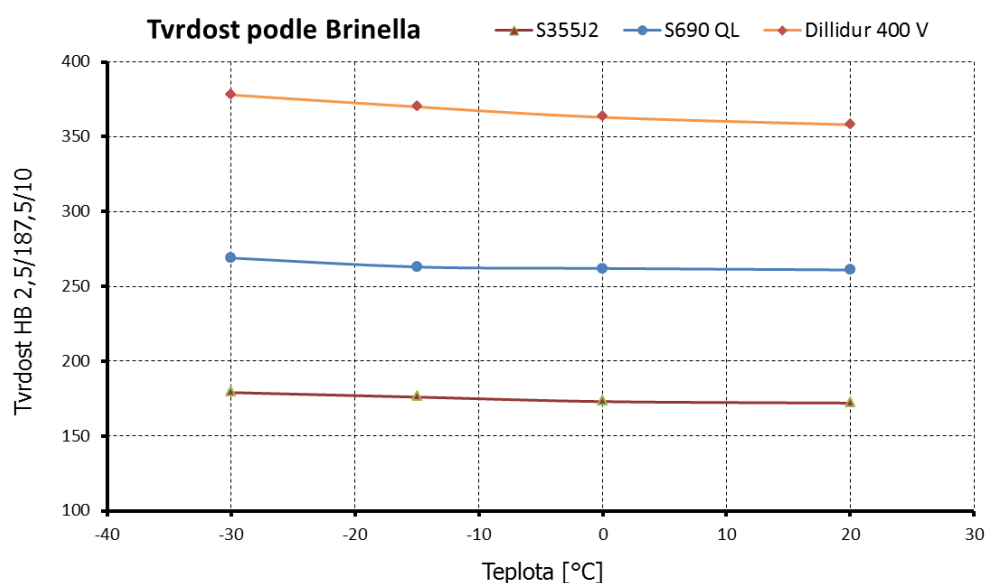


zaručena požadovaná teplota v celém objemu. Zatěžovací síla byla zvolena 187,5kp a jako indentor byla vybrána tvrdokovová kulička o průměru 2,5 mm, která byla vtlačována po dobu 10 s do zkoušeného materiálu. Z těchto zvolených parametrů vyplývá značení tvrdosti a to *HBW 2,5/187,5/10*, které popisuje podmínky měření. Před začátkem měření se vždy zachladila opěrná deska tvrdoměru, aby byl minimální přestup tepla a nedocházelo k ovlivnění výsledných hodnot. Pro každý materiál (3 druhy) s přihlédnutím na teplotu při zkoušce (4 teploty) se provedlo pět měření, z kterých se stanovila průměrná tvrdost dle Brinella.

Tab. 3.13: Průměrné hodnoty tvrdosti *HBW 2,5/187,5/10*

| Teplota [°C] | Materiál:  |              |            |              |                |              |
|--------------|------------|--------------|------------|--------------|----------------|--------------|
|              | S355J2     |              | S690 QL    |              | Dillidur 400 V |              |
|              | <i>HBW</i> | Sm. odchylka | <i>HBW</i> | Sm. odchylka | <i>HBW</i>     | Sm. odchylka |
| 20           | 171,6      | 1,02         | 260,6      | 1,20         | 358            | 3,85         |
| 0            | 173        | 0,89         | 262        | 0,89         | 363,4          | 1,2          |
| -15          | 176        | 0,89         | 263,2      | 1,47         | 369,8          | 2,79         |
| -30          | 179,2      | 0,75         | 269,6      | 1,02         | 378            | 2,28         |

Z průměrných hodnot tvrdosti pro jednotlivé teploty byl sestaven graf (obr. 3.20), na kterém je vynesena závislost změny tvrdosti na teplotě.



Obr. 3.20: Grafické vyjádření závislosti tvrdosti dle Brinella na teplotě

### 3.5.1 Diskuze výsledků ze zkoušky tvrdosti

Z naměřených hodnot a z grafu (obr. 3.20) je patrné, že s klesající teplotou roste tvrdost materiálů. Změna je pouze minimální a z obr. 3.20 je zřejmé, že nárůst tvrdosti vzhledem k teplotě je u všech materiálů velmi podobný. Největší změna tvrdosti o 20 HBW 2,5/187,5 se projevila u materiálu Dillidur 400 V, ale jelikož je materiál otěruvzdorný a jeho tvrdost by se měla pohybovat v rozmezí 370 až 430 HBW je tato změna v procentuálním vyjádření pouze 5,5%. U materiálu S355J2 se tvrdost zvýšila o 4,5% a u materiálu S690 QL o 3,5%. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že změna tvrdosti v závislosti na teplotě byla do 6% jako u hodnot meze kluzu a meze pevnosti, takže je téměř zanedbatelná. Tvrdosti zkoušených materiálů se od sebe podstatně liší, proto metoda měření tvrdosti může také sloužit při špatném nebo neúplném označení plechu pro rychlé určení jeho jakosti.

### 3.6 Zjištění mechanických hodnot materiálů rázovou zkouškou

Rázovou zkouškou byla zjištěna nárazová práce pomocí předem připravených normalizovaných vzorků, které byly opatřeny U-vrubem. Nejdříve se zkoušky provedly za teploty 20°C na pěti vzorcích pro každý materiál a směr odebrání vzorku. Po každé zkoušce byly vzorky zkontrolovány, zda jsou zcela přeraženy a roztrženy pro pozdější určení vzhledu lomové plochy. Pokud vzorek nebyl zcela přeražen nebo se výsledná hodnota velmi lišila od ostatních, byla zkouška opakována. Stejným způsobem byly prováděny i zbylé zkoušky pro teploty 0, -15, -30°C. Vzorky se na tyto teploty zchlazovaly v laboratorní mrazničce s výdrží 30min. Po ukončení měření byl vyhodnocen vzhled lomových ploch. Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti byly vypočteny z nárazové práce dle vzorce (3.2) a jsou uvedeny v tab. 3.14, 3.15 a 3.16.

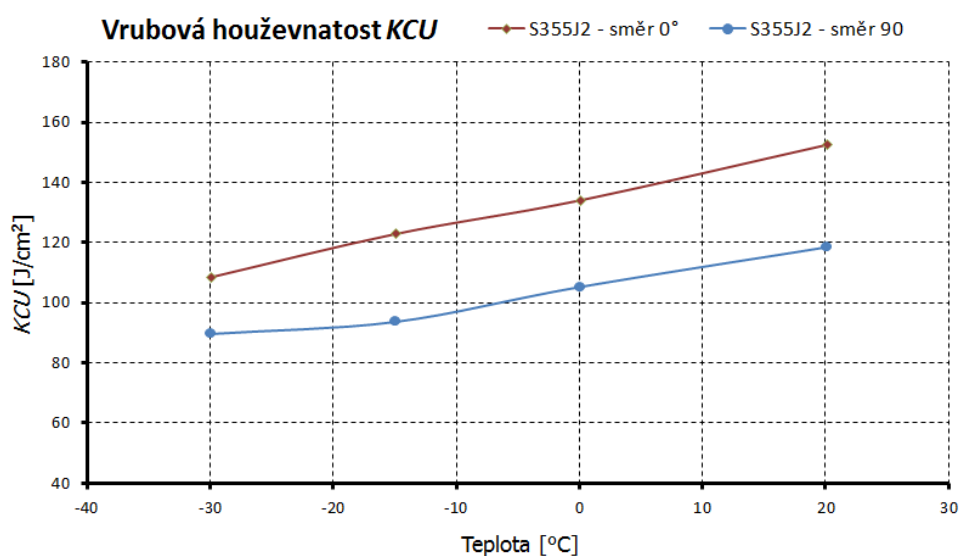
$$KCU = \frac{KU}{S_0} \text{ [J/cm}^2\text{]} \quad (3.2)$$

Kde: KCU ... Vrbová houževnatost vzorku s V, U vrubem [J/cm<sup>2</sup>]  
KU ... Nárazová práce pro vzorek s V nebo U vrubem [J]  
S<sub>0</sub> ... Plocha průřezu v místě vrubu [cm<sup>2</sup>]

Z průměrných hodnot pro jednotlivé teploty je v grafech (obr. 3.21, obr. 3.22, obr. 3.23) sestavena závislost změny vrubové houževnatosti na teplotě.

Tab. 3.14: Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti  $KCU$  [ $J/cm^2$ ]  
pro materiál S355J2

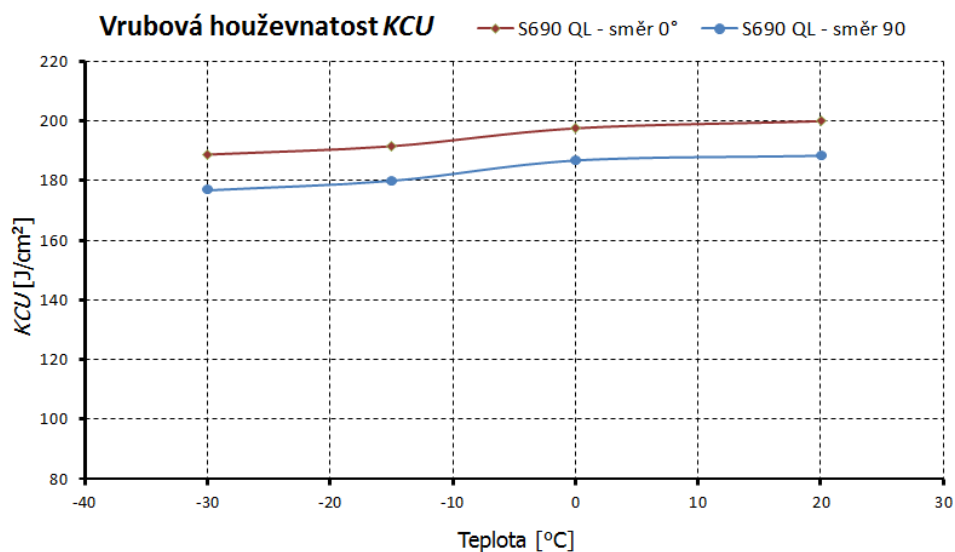
| Teplota [ $^{\circ}C$ ] | Směr odebrání vzorku |              |                    |              |
|-------------------------|----------------------|--------------|--------------------|--------------|
|                         | 0 $^{\circ}$         |              | 90 $^{\circ}$      |              |
|                         | $KCU$ [ $J/cm^2$ ]   | Sm. odchylka | $KCU$ [ $J/cm^2$ ] | Sm. odchylka |
| 20                      | 152,4                | 3,44         | 118,4              | 2,33         |
| 0                       | 134                  | 4,9          | 105,2              | 4,31         |
| -15                     | 122,8                | 4,12         | 93,6               | 4,63         |
| -30                     | 108,4                | 4,27         | 89,6               | 3,44         |



Obr. 3.21: Grafické vyjádření závislosti vrubové houževnatosti  $KCU$  na teplotě  
pro materiál S355J2

Tab. 3.15: Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti  $KCU$  [ $J/cm^2$ ]  
pro materiál S690 QL

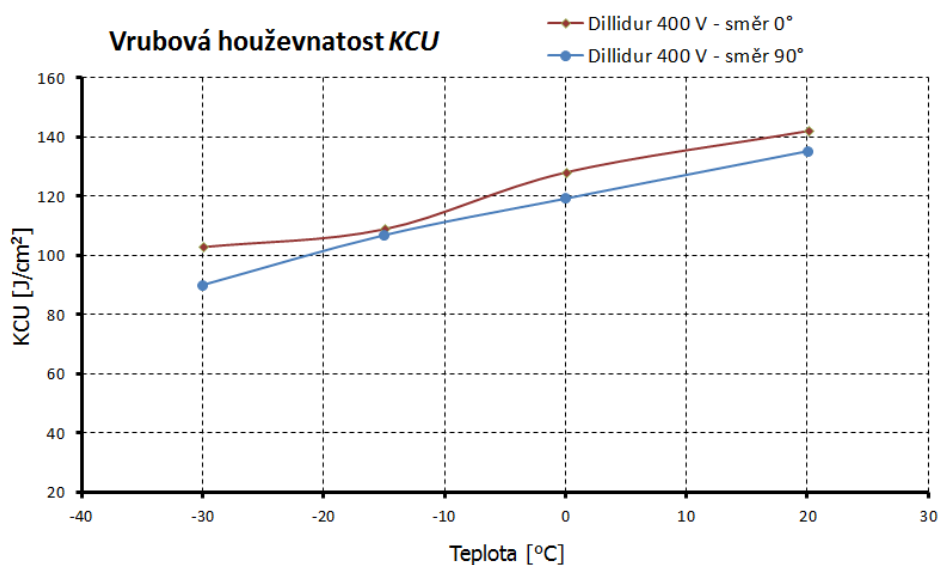
| Teplota [ $^{\circ}C$ ] | Směr odebrání vzorku |              |                    |              |
|-------------------------|----------------------|--------------|--------------------|--------------|
|                         | 0 $^{\circ}$         |              | 90 $^{\circ}$      |              |
|                         | $KCU$ [ $J/cm^2$ ]   | Sm. odchylka | $KCU$ [ $J/cm^2$ ] | Sm. odchylka |
| 20                      | 200                  | 3,35         | 188,4              | 3,44         |
| 0                       | 197,6                | 1,5          | 186,8              | 9,17         |
| -15                     | 191,6                | 6            | 180                | 4            |
| -30                     | 188,8                | 5,74         | 176,8              | 10           |



Obr. 3.22: Grafické vyjádření závislosti vrubové houževnatosti  $KCU$  na teplotě pro materiál S690 QL

Tab. 3.16: Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti  $KCU$  [J/cm²] pro materiál Dillidur 400 V

| Teplota [°C] | Směr odebrání vzorku |              |               |              |
|--------------|----------------------|--------------|---------------|--------------|
|              | 0°                   |              | 90°           |              |
|              | $KCU$ [J/cm²]        | Sm. odchylka | $KCU$ [J/cm²] | Sm. odchylka |
| 20           | 142                  | 3,58         | 135,2         | 3,71         |
| 0            | 128                  | 4            | 119,2         | 6,88         |
| -15          | 108,8                | 4,31         | 106,8         | 5,74         |
| -30          | 102,8                | 4,83         | 90            | 4,38         |



Obr. 3.23: Grafické vyjádření závislosti vrubové houževnatosti  $KCU$  na teplotě pro materiál Dillidur 400 V

### 3.6.1 Diskuze výsledků ze zkoušky rázem

Z naměřených hodnot ze zkoušky rázem je zřejmé, že klesající teplota a anizotropie mají výrazný vliv na vrubovou houževnatost některých zkoušených materiálů. Zde se potvrdil předpoklad, že se sníženou teplotou bude klesat vrubová houževnatost. Kombinace nízké teploty a velkých rázů, které jsou časté při teplotách pod bodem mrazu, může být příčinou deformace výrobku na částech, které jsou navrhovány z materiálů S355J2 a Dillidur 400 V.

Z obr. 3.21 je patrné, že směr odebrání vzorku (směr 0°, směr 90°) má největší vliv na vrubovou houževnatost u materiálu S355J2. Pokles vrubové houževnatosti vzhledem ke směru 0° je 20%, proto by se mělo dbát u částí výrobků z tohoto materiálu, na kterých se v minulosti objevily trhliny, na vhodné natočení výrobku vůči směru válcování plechu. Anizotropie u materiálů Dillidur 400 V (obr. 3.23) a S690 QL (obr. 3.22) se projevila poklesem houževnatosti maximálně o 8%, proto je téměř zanedbatelná.

Změna vrubové houževnatosti v závislosti na teplotě se nejméně projevila u materiálu S690 QL. Z obr. 3.22 je zřejmé, že hodnoty houževnatosti vzorků odebraných v obou směrech byly z porovnávaných materiálů nejlepší a klesly maximálně o 6%, proto lze konstatovat, že teplota pod bodem mrazu nemá na mechanické vlastnosti tohoto materiálu výrazný vliv a jeho použití je z konstrukčního hlediska nejbezpečnější.

Vrubová houževnatost materiálu S355J2 klesala v závislosti na teplotě (obr. 3.21) pro směr 0° o 29% a pro směr 90° o 24,5%. Podobný pokles vrubové houževnatosti pro směr 0° (obr. 3.23) byl zaznamenán i u materiálu Dillidur 400 V, který byl 27,5%. Tento materiál vykazoval pro směr odebrání 90° pokles vrubové houževnatosti o 44%. Proto bych doporučil dbát na vhodné natočení výrobku.

Dále byly na přeražených vzorcích zkontrolovány lomové plochy a podle nich vyhodnocen typ lomu. Vzorky z materiálů S355J2 a Dillidur 400 V se s klesající teplotou méně plasticky deformovaly tak, že podíl houževnatého lomu plynule klesal. Vzhled lomové plochy materiálu S690 QL se s klesající teplotou téměř nezměnil a podíl houževnatého lomu výrazně převyšoval podíl křehkého lomu. Tyto změny vzhledu lomových ploch potvrdily naměřené výsledky.

## 4 Numerická část

### 4.1 Popis zvoleného programu MKP – Ansys

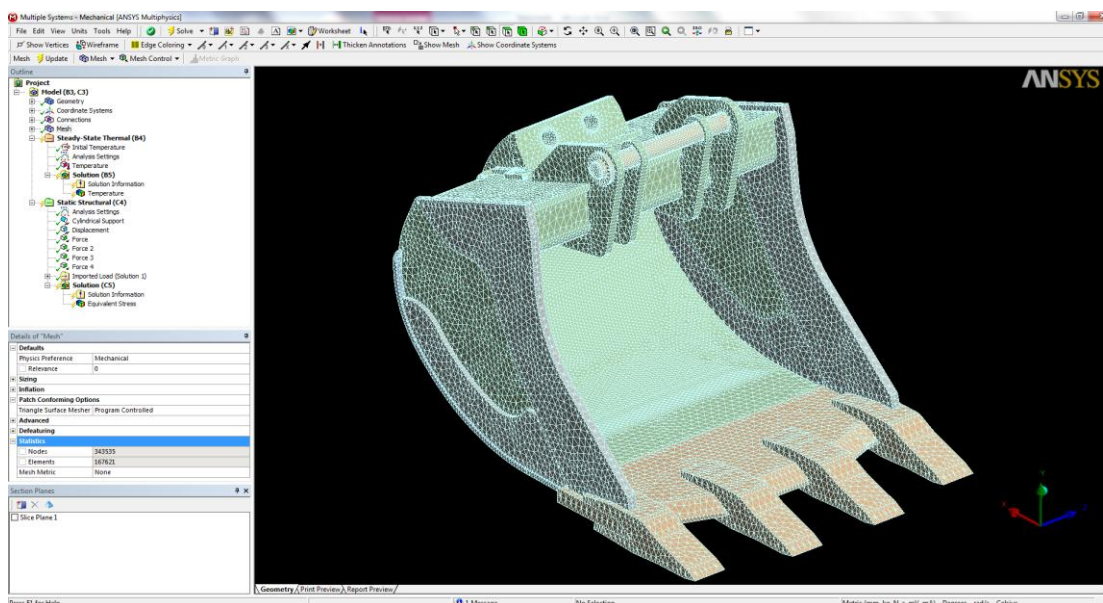
Výpočetní program Ansys je vyvíjen americkou společností ANSYS, Inc.. Jedná se o velmi výkonný multifyzikální FEM systém pro analýzu nejširší třídy problémů metodou konečných prvků. V základní verzi umožňuje řešit úlohy lineární a nelineární statiky a dynamiky, obecné problémy teplotních polí, proudění, elektromagnetismus.

Postavený je na jednotné příkazové databázi, která zahrnuje všechny části programu od preprocesingu (tvorba geometrického a simulačního modelu včetně zadání materiálových vlastností atd.), přes solver (zadání okrajových podmínek, nastavení parametrů řešení, spuštění vlastního výpočtu) až po postprocessory (výpis a vykreslení výsledků) a to vše na jediné společné bázi.

Pracuje na tzv. H – metodě (konvergenci) neboli zvyšování počtu prvků a uzlů tvořících síť při neměnném stupni aproximačního polynomu, kde je maximální konečný počet prvků prakticky neomezen. Systém může proto řešit na výkonných počítačích i úlohy o statisících či miliónech stupních volnosti. Aproximační stupeň polynomu je předdefinován na úroveň druhého stupně, ale může být i vyšší.

Ansys má vlastní knihovnu materiálů nebo si lze materiály libovolně nadefinovat. Konečné prvky mohou být zvoleny ve tvaru trojúhelníku, čtverce, čtyřstěnu, šestistěnu nebo v různých kombinacích. Výpočetní modely proto mohou být navrženy jako 1D, 2D, 3D nebo kombinované.

Program je navržen pro jednoduché propojení nebo přímou vestavbu do CAD systémů (Pro/ENGINEER, SolidWorks AutoCAD, Inventor, SolidEdge, atd.) a to velmi pomáhá při výpočtech tvarově složitých konstrukčních modelů (např. podkopových lžic, ozubených kol, rozrývacích háků atd.).

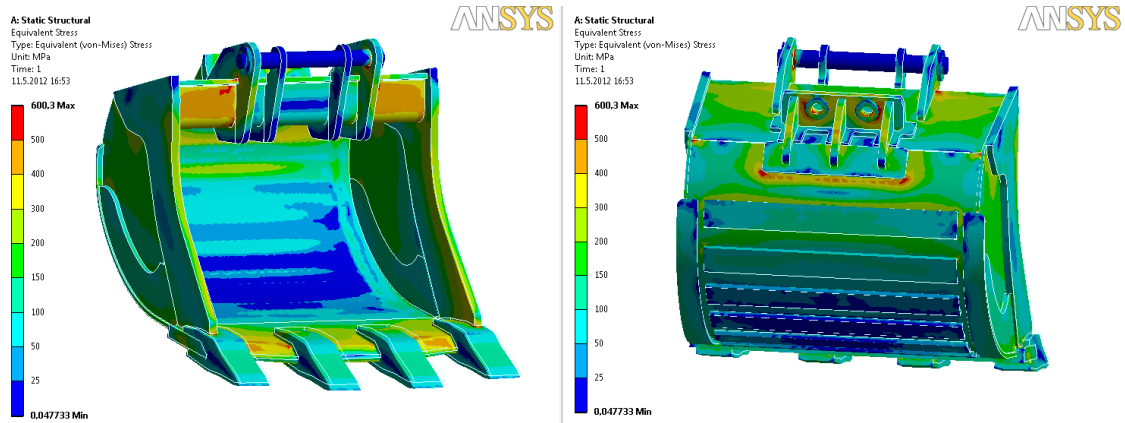


Obr. 4.1: Prostředí výpočetního systému Ansys a ukázka výrobku s nanesenou deformační sítí

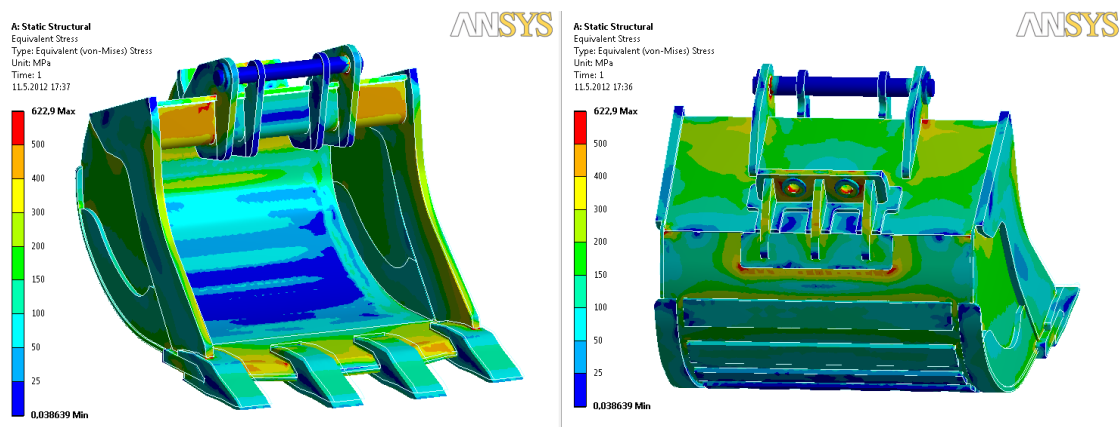
## 4.2 Aplikace získaných hodnot pro simulační model výrobku fy. Triga-MF

Vybrané výsledky získané z experimentů byly dále použity pro simulační model firmy Triga-MF. Pro porovnání bezpečnosti konstrukce výrobku byly aplikovány hodnoty meze kluzu a meze pevnosti pro jednotlivé materiály tj. S355J2, S690 QL a Dillidur 400 V. Firma Triga-MF pro své prototypy využívá zejména lineární elastický materiálový model, ve kterém je potřeba ještě zavést modul pružnosti, hustotu a poissonovo číslo. Pro výpočet v MKP byly zavedeny kritické hodnoty z výsledků získaných při tahových zkouškách za teploty 20°C a -30°C.

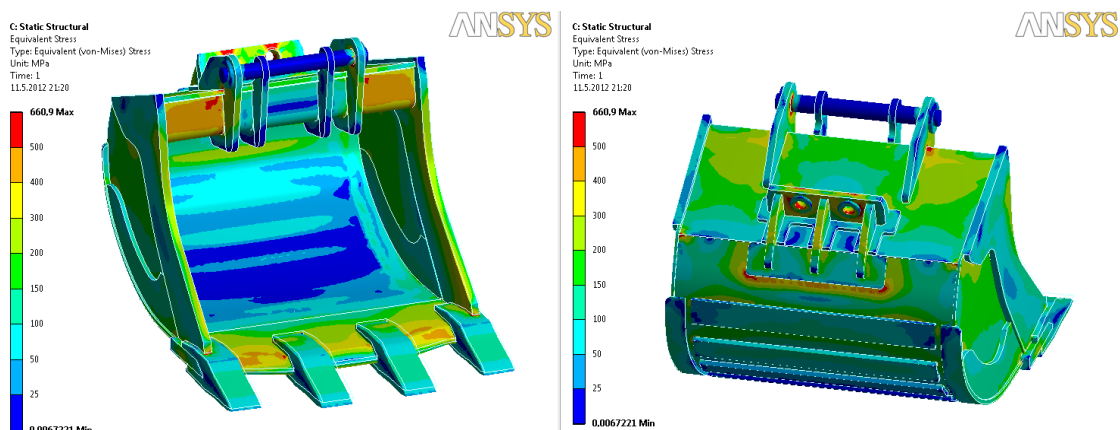
Z těchto hodnot se pomocí modelových simulací získalo porovnání výsledků napětí, deformace a faktoru bezpečnosti pro jednotlivé teploty. Teplota simulačního modelu byla vždy nastavena stejně jako při experimentu, ve kterém byly tyto hodnoty získány. Výsledky simulací byly dále porovnány se stávajícím simulačním modelem firmy Triga-MF (obr. 4.2 až 4.10) pro posouzení, jak vybrané výsledky ovlivňují rozložení napětí, deformace a faktor bezpečnosti v modelu.



Obr. 4.2: MKP model výrobku: Výsledek celkového napětí podle metodiky výpočtu firmy Triga-MF

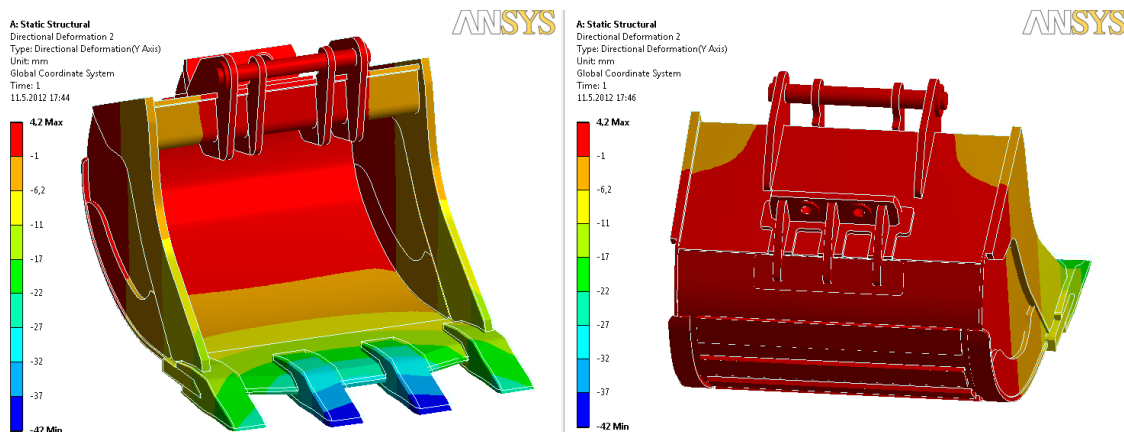


Obr. 4.3: MKP model výrobku: Výsledek celkového napětí podle získaných hodnot při teplotě 20°C

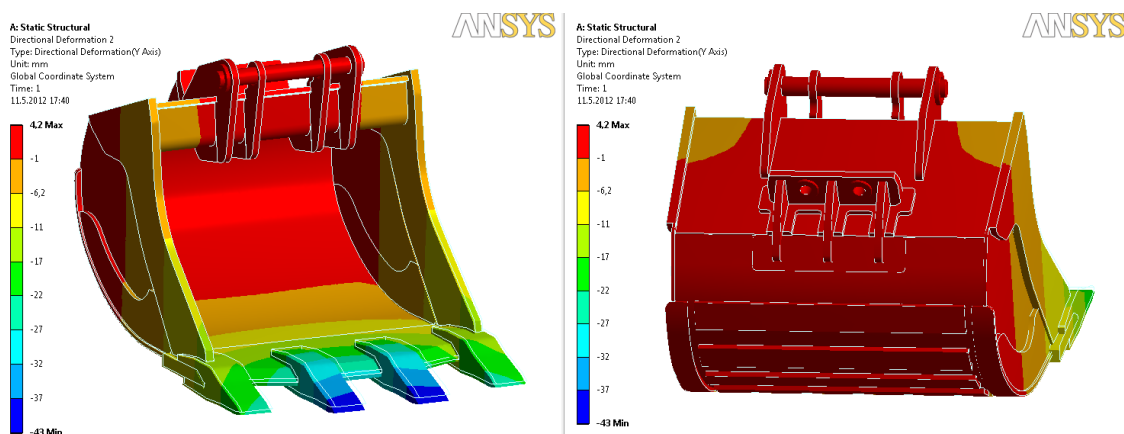


Obr. 4.4: MKP model výrobku: Výsledek celkového napětí podle získaných hodnot při teplotě -30°C

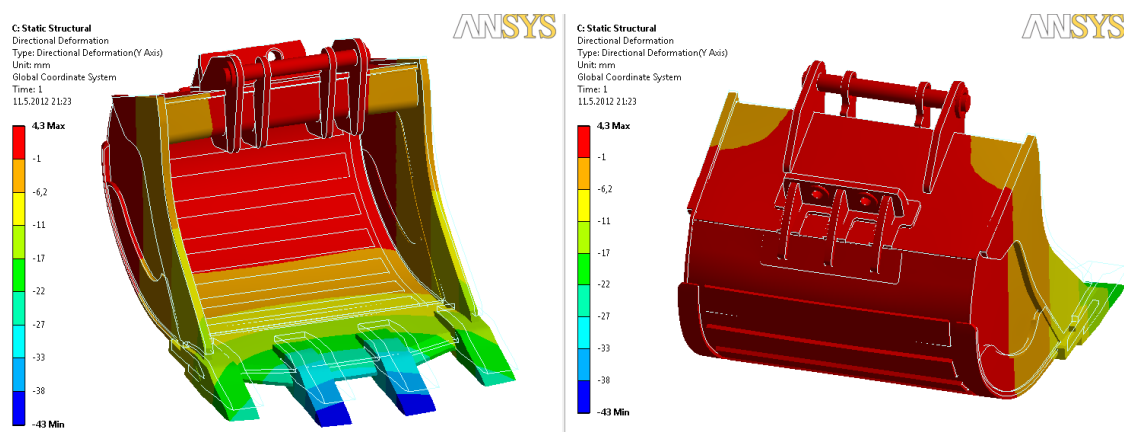




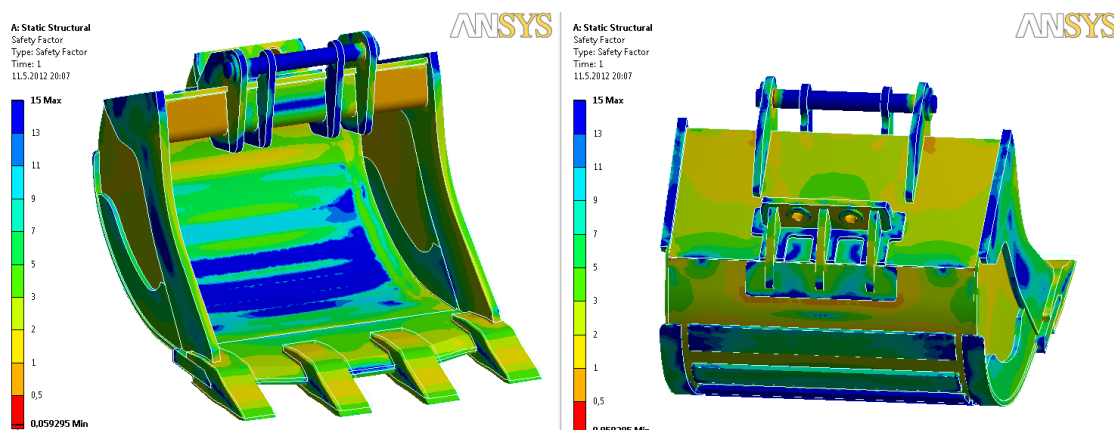
Obr. 4.5: MKP model výrobku: Velikost deformace v ose zatížení podle metodiky výpočtu firmy Triga-MF



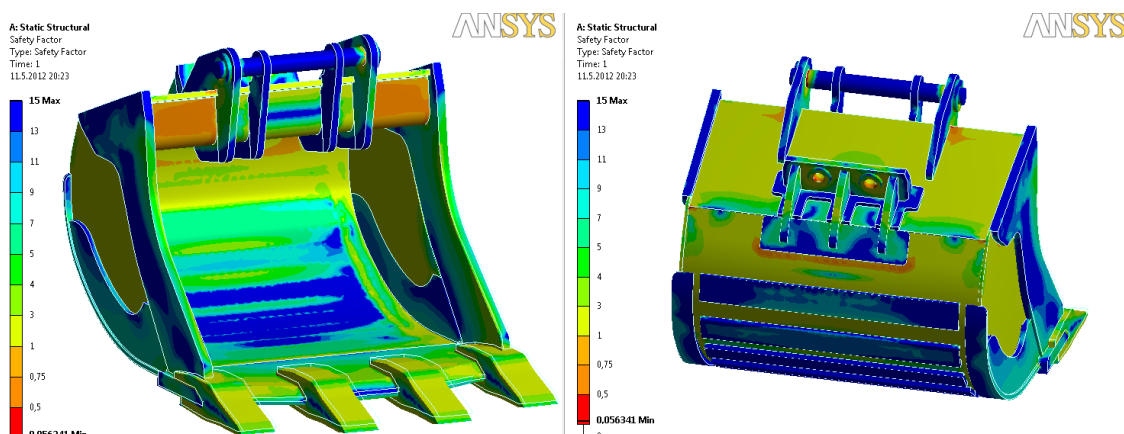
Obr. 4.6: MKP model výrobku: Velikost deformace v ose zatížení podle získaných hodnot při teplotě 20°C



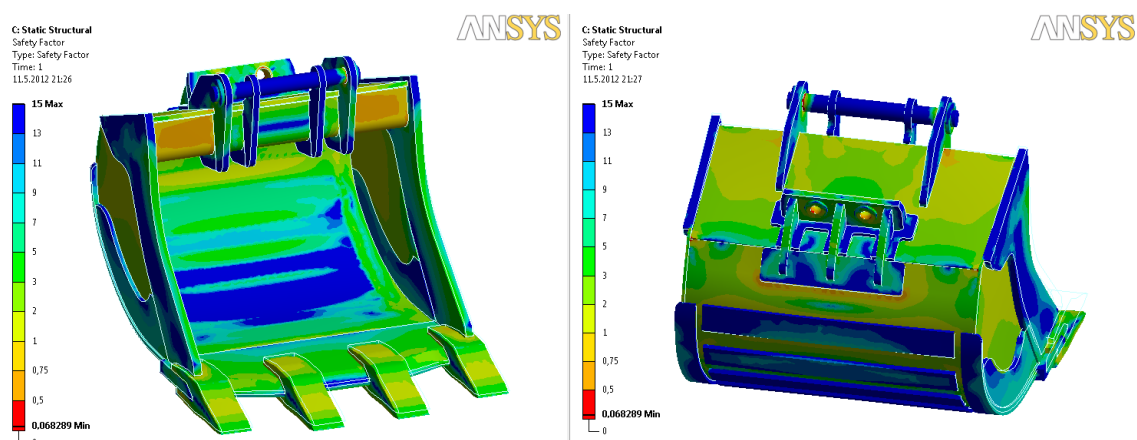
Obr. 4.7: MKP model výrobku: Velikost deformace v ose zatížení podle získaných hodnot při teplotě -30°C



Obr. 4.8: MKP model výrobku: Faktor bezpečnosti podle metodiky výpočtu firmy Triga-MF



Obr. 4.9: MKP model výrobku: Faktor bezpečnosti podle získaných hodnot při teplotě 20°C



Obr. 4.10: MKP model výrobku: Faktor bezpečnosti podle získaných hodnot při teplotě -30°C

### 4.3 Vyhodnocení a diskuze výsledků numerické simulace

Z výsledků rozložení napětí, které jsou uvedeny na obr. 4.2–4.4 je patrné, že vstupní data získaná z experimentů tahové zkoušky pro teplotu  $+20^{\circ}\text{C}$  a  $-30^{\circ}\text{C}$ , výrazně neovlivňují maximální hodnotu celkového napětí. V porovnání s původními daty firmy Triga-MF se napětí ze získaných experimentálních hodnot při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  zvýšilo o 4% (obr. 4.3) a při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$  o 10% (obr. 4.4). To je charakteristické i prakticky stejným průběhem deformace jak znázorňují obr. 4.5–4.7. Určité rozdíly v maximálních hodnotách napětí a deformace jsou nejspíše ovlivněny nastavením teploty simulačního modelu, kterou program Ansys dokáže při výpočtu zohlednit. Výrazně se to projevilo v rozložení faktoru bezpečnosti (obr. 4.8–4.10), což je především dáno tím, že se vlivem teploty při experimentech měnily hodnoty meze kluzu a meze pevnosti. Celkově lze konstatovat, že významně by se výsledky simulací mohly lišit jen tehdy, kdyby se aplikovaly i výsledné hodnoty ze zkoušky vrubové houževnatosti, které by se využily při modelových simulacích. Protože firma Triga-MF potřebuje pro své výrobky a produkty nejvyšší kvalitu, která je zaručena jen v oblasti vratných elastických deformací, jsou v současné době využívány především lineárně-elastické materiálové modely, pro které se hodnoty ze zkoušky vrubové houževnatosti nedají použít. Při řešení tohoto problému s firemním specialistou, zodpovědným za modelové simulace konstrukčních výrobků, se došlo k závěru, že tyto hodnoty by se nechaly aplikovat pouze při použití elasto-plastického materiálového modelu, který umožňuje zahrnout při výpočtu plastické porušení materiálu. Z důvodu časové náročnosti přípravy simulačního modelu a výpočtu je tento typ materiálového modelu využíván jen ojediněle. Protože získané experimentální výsledky ze zkoušky vrubové houževnatosti vykazují s klesající teplotou velký pokles hodnot, doporučuji pro první návrhy prototypů výrobků, u kterých se předpokládá, že budou vystaveny velkým rázům za nízkých teplot, použít i elasto-plastického materiálového modelu pro zpřesnění výsledků ze simulací.

## 5 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo stanovit, jak výrazně ovlivňuje teplota pod bodem mrazu mechanické vlastnosti zvolených konstrukčních materiálů. Podle výsledných hodnot získaných z experimentů mělo být stanoveno, jestli změna teploty mohla být příčinou vzniku trhlin na výrobcích firmy Triga-MF. Tyto hodnoty dále měly být využity pro modelové simulace v prostředí MKP, které by mohly zpřesnit hodnoty, jež firma Triga-MF používá při optimalizaci výrobků. Pro zvolené materiály s označením EN S355J2, S690 QL a Dillidur 400 V byly naměřeny a porovnány mechanické hodnoty pomocí tahové zkoušky a zkoušky vrubové houževnatosti. Z výsledků je patrné, že hodnoty získané měřením se za jednotlivých teplot mění.

Výsledné naměřené hodnoty meze kluzu a meze pevnosti se zvyšovaly během teplotního rozdílu 20 až -30°C v rozmezí 6%, zatímco tažnost klesala v rozmezí 11%. To charakterizuje, že z hlediska pevnosti výrobku jsou tyto hodnoty zanedbatelné. Hodnoty tvrdosti se s klesající teplotou zvyšovaly v rozmezí 6% pro jednotlivé materiály, proto je tato změna také zanedbatelná. Změna teploty se nejvíce projevila na vrubové houževnatosti materiálů S355J2 a Dillidur 400 V, u kterých klesla průměrně o 30%. Anizotropie plechů se výrazně projevila pouze při vrubové houževnatosti materiálu S355J2. Získané hodnoty byly následně poskytnuty firmě Triga-MF pro definování vstupních parametrů k stávajícímu simulačnímu modelu výrobku firmy Triga-MF. Výsledky modelových simulací ukázaly, že se s klesající teplotou pevnost výrobku naopak mírně zvětšovala a to při teplotě 20°C o 4% a při teplotě -30°C až o 10%.

Z výsledků diplomové práce vyplývá, že teplota pod bodem mrazu má výrazný vliv pouze na vrubovou houževnatost. Pokles vrubové houževnatosti mohl zapříčinit vznik trhlin na výrobcích. Tyto výsledky nelze pomocí modelových simulací porovnat, protože se ve firmě Triga-MF provádějí simulace kvůli větší bezpečnosti výrobků zejména jen pomocí lineárně-elastického materiálového modelu, pro který se hodnoty ze zkoušky vrubové houževnatosti nedají použít. Tyto hodnoty by se nechaly aplikovat pouze při použití elasto-plastického materiálového modelu, který by mohl zpřesnit výsledky simulací. Pokud nebude vytvořen tento materiálový model, který je velmi pracný a složitý, nelze výrobky pomocí naměřených hodnot nijak porovnávat.



Proto doporučuji, než bude tento materiálový model vytvořen, výhradně nakupovat plechy, které mají zaručenou vrubovou houževnatost do velmi nízkých teplot pod bodem mrazu a tím předejít možnému vzniku trhlin na výrobcích.



## 6 Seznam použité literatury

- [1] [www.triga.cz](http://www.triga.cz), březen 2012
- [2] Horák, L.: *Zjištění křivek přetvárné pevnosti pomocí optického systému ARAMIS*. Diplomová práce. Liberec: TU v Liberci, 2011.
- [3] Lenfeld, P.: *Technologie II. – 1. Část*, TUL, Liberec, 2005
- [4] Nová, I.: *Materiály a strojírenská technologie*, VŠST, Liberec, 1990
- [5] Jareš, V.: *Základní zkoušky kovů a jejich teorie*, ACADEMIA, Praha, 1966
- [6] Molliková, E.: *Zkouška tahem*, březen 2012  
<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/ZKOUSKA%20TAHEM.doc>
- [7] Driml, B.: *Metody zkoušení mechanických vlastností materiálů*, březen 2012  
[http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky\\_mat.pdf](http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf)
- [8] Molliková, E.: *Zkouška rázem*, březen 2012  
<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/ZKOUSKA%20RAZEM%20V%20OBYBU.doc>
- [9] Petruška, J.: *Počítačové metody mechaniky I a II*, VUT, Brno, 2003
- [10] [www.ferona.cz](http://www.ferona.cz), duben 2012
- [11] [www.salzgitter-flachstahl.de](http://www.salzgitter-flachstahl.de), duben 2012
- [12] [www.bolzano.cz](http://www.bolzano.cz), duben 2012
- [13] [www.svarbazar.cz](http://www.svarbazar.cz), duben 2012
- [14] [www.ruukki.cz](http://www.ruukki.cz), duben 2012
- [15] [www.lega.cz](http://www.lega.cz), duben 2012
- [16] ČSN EN – ISO 6892-1: *Kovové materiály – Zkouška tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*, 2009.



## **7 Přílohy**

1. Protokoly ze statické zkoušky tahem testovaných materiálů
2. Tabulka naměřených hodnot ze zkoušky tvrdosti dle Brinella
3. Tabulka naměřených hodnot ze zkoušky vrubové houževnatosti
4. Výrobní výkresová dokumentace (na přiloženém CD)
5. Atesty zkoušených materiálů od výrobce (na přiloženém CD)
6. Diplomová práce v elektronické podobě (na přiloženém CD)



Příloha č. 1

Protokoly ze statické zkoušky tahem  
testovaných materiálů





## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

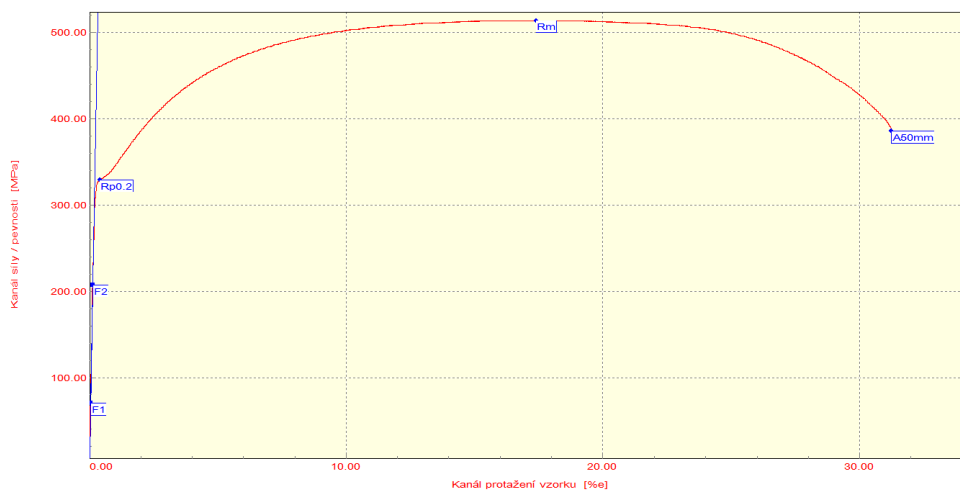
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S355J2  
Norma: : EN 10025-2  
Podmínky měření : 20°C  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------|-----------|--------|---------|
| 1             | 329.4     | 514.0  | 31.00   |
| 2             | 329.5     | 513.1  | 30.53   |
| 3             | 332.4     | 513.4  | 30.25   |
| 4             | 327.0     | 508.9  | 30.21   |
| 5             | 332.5     | 517.5  | 30.84   |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------------|-----------|--------|---------|
| Počet zkoušek       | 5         | 5      | 5       |
| Průměrná hodnota    | 330.2     | 513.4  | 30.57   |
| Směrodatná odchylka | 2.4       | 3.0    | 0.35    |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

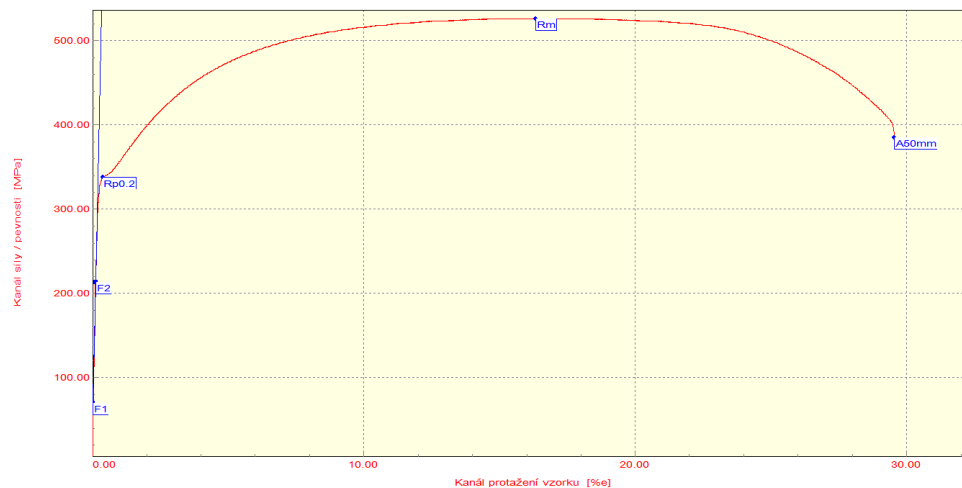
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S355J2  
Norma: : EN 10025-2  
Podmínky měření : 0°C  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------|--------------|-----------|------------|
| 1             | 338.0        | 526.3     | 29.34      |
| 2             | 331.1        | 512.6     | 29.34      |
| 3             | 327.7        | 510.6     | 29.63      |
| 4             | 328.9        | 509.2     | 29.40      |
| 5             | 331.8        | 517.5     | 30.29      |

| Statistická hodnota | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek       | 5            | 5         | 5          |
| Průměrná hodnota    | 331.5        | 515.2     | 29.60      |
| Směrodatná odchylka | 4.0          | 6.9       | 0.41       |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

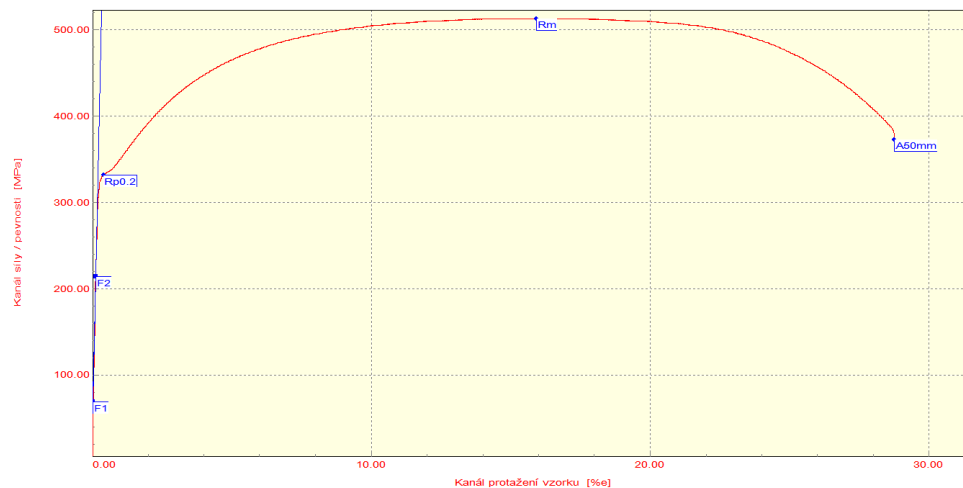
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S355J2  
Norma: : EN 10025-2  
Podmínky měření: : -15°C  
Směr odebrání vzorku: : 0°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------|--------------|-----------|------------|
| 1             | 332.0        | 513.4     | 28.55      |
| 2             | 336.1        | 540.7     | 29.53      |
| 3             | 334.7        | 517.8     | 28.85      |
| 4             | 341.0        | 530.8     | 28.08      |
| 5             | 337.5        | 522.1     | 29.05      |

| Statistická hodnota | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek       | 5            | 5         | 5          |
| Průměrná hodnota    | 336.3        | 525.0     | 28.81      |
| Směrodatná odchylka | 3.4          | 10.9      | 0.55       |



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

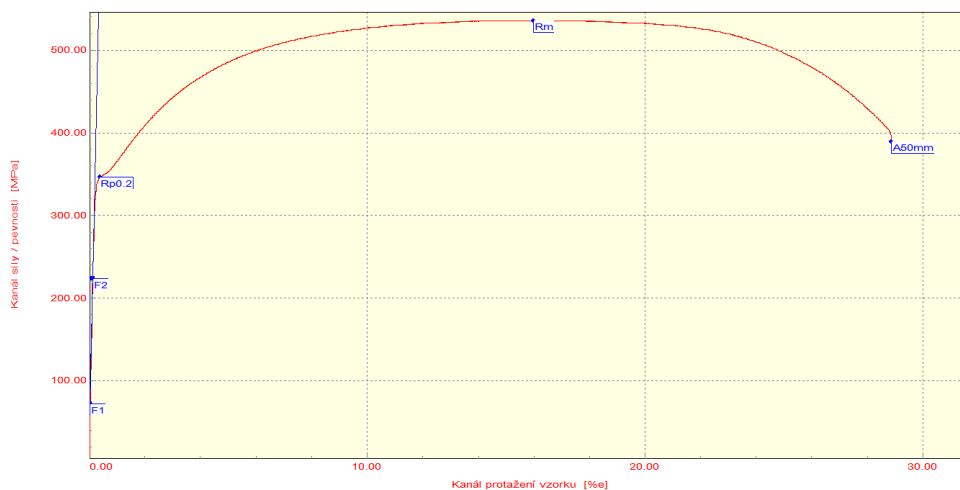
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S355J2  
Norma: : EN 10025-2  
Podmínky měření : -30°C  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------|--------------|-----------|------------|
| 1             | 346.4        | 535.8     | 28.66      |
| 2             | 340.4        | 526.6     | 27.80      |
| 3             | 341.1        | 530.8     | 27.54      |
| 4             | 339.9        | 529.0     | 28.40      |
| 5             | 339.2        | 524.8     | 28.06      |

| Statistická hodnota | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek       | 5            | 5         | 5          |
| Průměrná hodnota    | 341.4        | 529.4     | 28.09      |
| Směrodatná odchylka | 2.9          | 4.2       | 0.45       |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

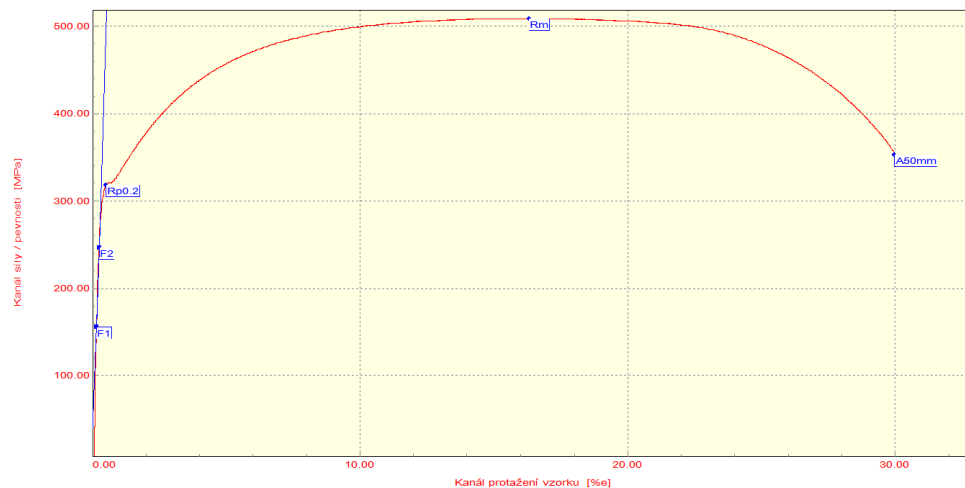
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S355J2  
Norma: : EN 10025-2  
Podmínky měření: : 20°C  
Směr odebrání vzorku: : 90°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 28.2. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------|--------------|-----------|------------|
| 1             | 318.7        | 508.7     | 29.62      |
| 2             | 317.0        | 504.7     | 29.82      |
| 3             | 319.2        | 513.0     | 30.81      |
| 4             | 314.0        | 502.2     | 29.51      |
| 5             | 315.1        | 507.0     | 30.11      |

| Statistická hodnota | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek       | 5            | 5         | 5          |
| Průměrná hodnota    | 316.8        | 507.1     | 29.97      |
| Směrodatná odchylka | 2.2          | 4.1       | 0.52       |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

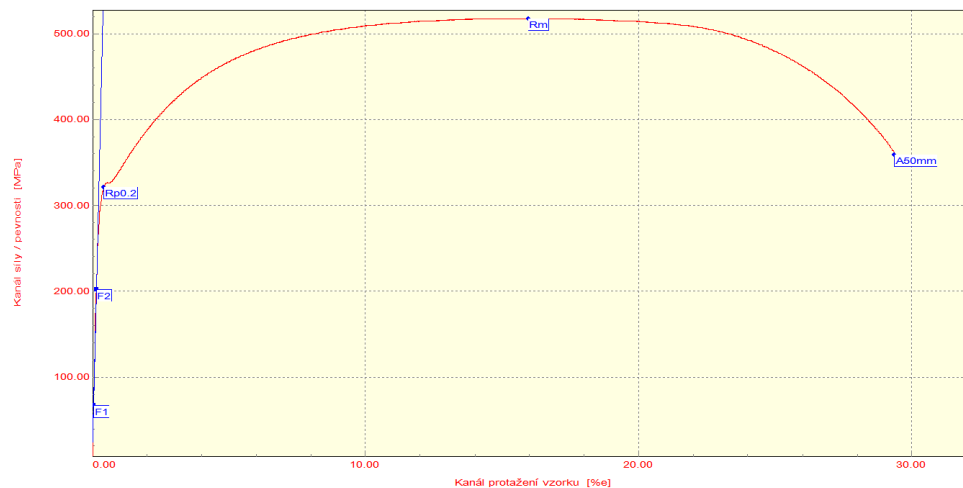
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S355J2  
Norma: : EN 10025-2  
Podmínky měření : 0°C  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------|--------------|-----------|------------|
| 1             | 321.2        | 517.3     | 29.12      |
| 2             | 316.3        | 508.9     | 29.48      |
| 3             | 315.9        | 508.7     | 29.12      |
| 4             | 320.8        | 518.2     | 30.24      |
| 5             | 328.7        | 509.2     | 29.69      |

| Statistická hodnota | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek       | 5            | 5         | 5          |
| Průměrná hodnota    | 320.6        | 512.5     | 29.53      |
| Směrodatná odchylka | 5.2          | 4.8       | 0.47       |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

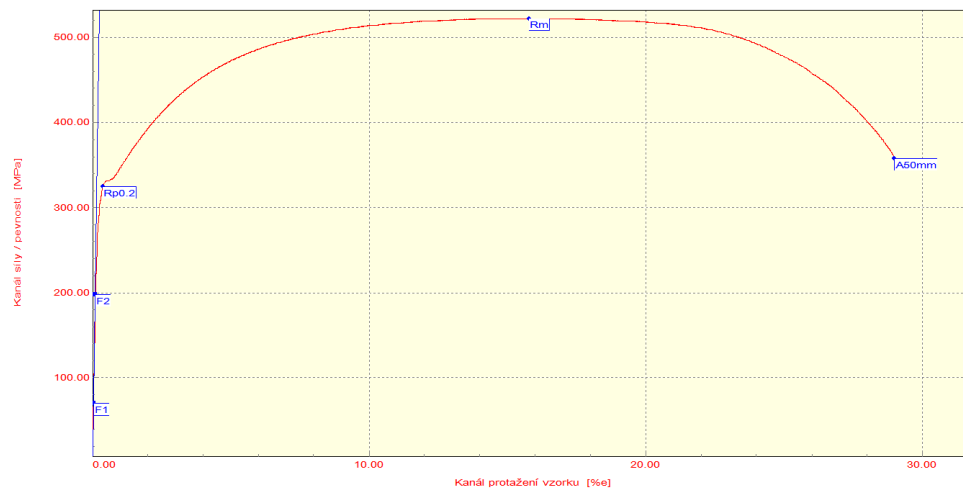
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S355J2  
Norma: : EN 10025-2  
Podmínky měření : -15°C  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------|--------------|-----------|------------|
| 1             | 324.7        | 522.1     | 28.78      |
| 2             | 321.7        | 517.3     | 28.33      |
| 3             | 330.3        | 531.3     | 29.37      |
| 4             | 325.7        | 524.4     | 29.17      |
| 5             | 330.9        | 532.2     | 28.99      |

| Statistická hodnota | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek       | 5            | 5         | 5          |
| Průměrná hodnota    | 326.6        | 525.5     | 28.93      |
| Směrodatná odchylka | 3.9          | 6.3       | 0.40       |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

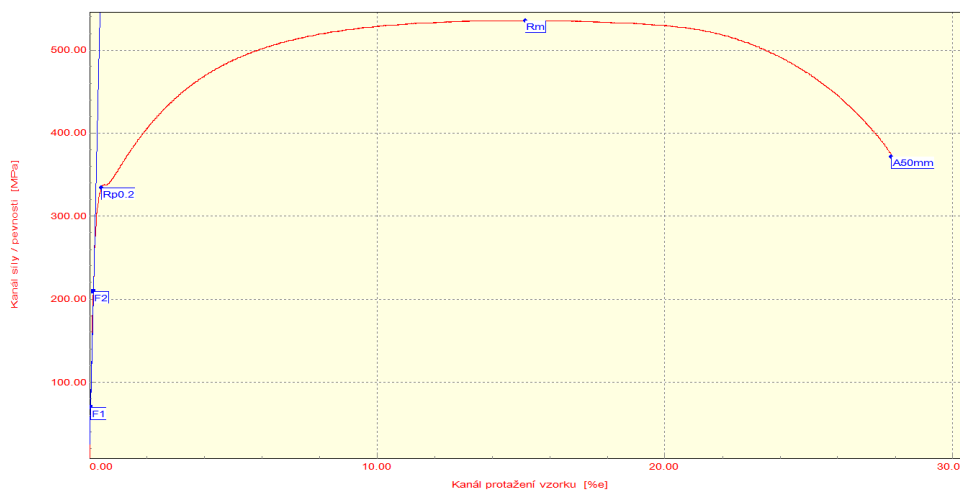
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S355J2  
Norma: : EN 10025-2  
Podmínky měření : -30°C  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------|--------------|-----------|------------|
| 1             | 333.6        | 535.5     | 27.63      |
| 2             | 336.7        | 540.7     | 28.42      |
| 3             | 327.8        | 526.2     | 27.68      |
| 4             | 333.9        | 536.0     | 28.32      |
| 5             | 327.8        | 526.2     | 27.78      |

| Statistická hodnota | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek       | 5            | 5         | 5          |
| Průměrná hodnota    | 332.0        | 532.9     | 27.97      |
| Směrodatná odchylka | 4.0          | 6.4       | 0.37       |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>





# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

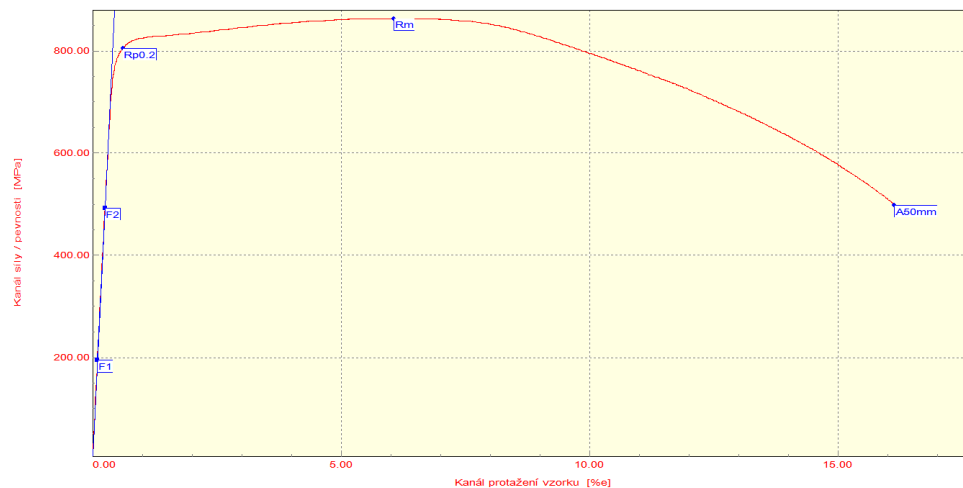
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S690QL  
Norma: : EN 10025-6  
Podmínky měření : 20°C  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------|--------------|-----------|------------|
| 1             | 805.0        | 863.3     | 15.88      |
| 2             | 797.9        | 866.3     | 16.01      |
| 3             | 791.7        | 863.7     | 15.93      |
| 4             | 802.9        | 878.3     | 15.94      |
| 5             | 790.4        | 849.4     | 16.01      |

| Statistická hodnota | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek       | 5            | 5         | 5          |
| Průměrná hodnota    | 797.6        | 862.2     | 15.95      |
| Směrodatná odchylka | 6.5          | 10.7      | 0.06       |



### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

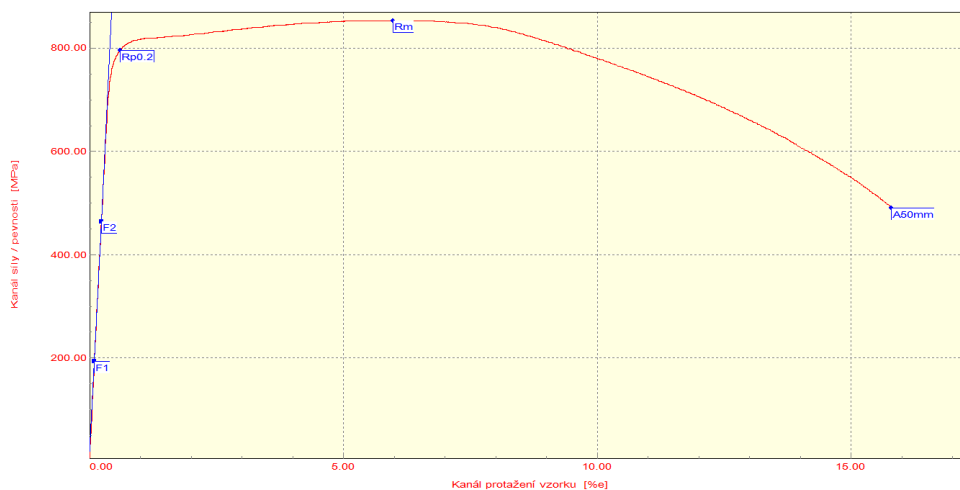
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S690QL  
Norma: : EN 10025-6  
Podmínky měření : 0°C  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------|--------------|-----------|------------|
| 1             | 796.2        | 863.6     | 16.56      |
| 2             | 805.9        | 878.3     | 16.93      |
| 3             | 805.2        | 863.3     | 16.70      |
| 4             | 812.1        | 870.4     | 16.57      |
| 5             | 806.7        | 863.3     | 16.00      |

| Statistická hodnota | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek       | 5            | 5         | 5          |
| Průměrná hodnota    | 805.2        | 866.7     | 16.56      |
| Směrodatná odchylka | 5.7          | 9.2       | 0.34       |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

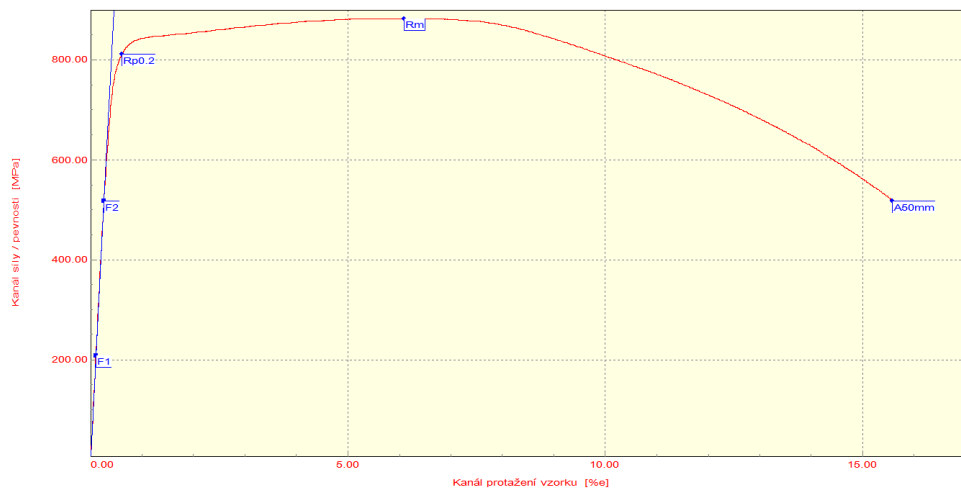
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S690QL  
Norma: : EN 10025-6  
Podmínky měření : -15°C  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------|--------------|-----------|------------|
| 1             | 811.7        | 882.8     | 15.32      |
| 2             | 807.1        | 863.3     | 14.72      |
| 3             | 805.9        | 863.3     | 15.26      |
| 4             | 811.1        | 867.5     | 14.72      |
| 5             | 807.5        | 878.3     | 15.32      |

| Statistická hodnota | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek       | 5            | 5         | 5          |
| Průměrná hodnota    | 808.7        | 871.0     | 15.07      |
| Směrodatná odchylka | 2.6          | 9.0       | 0.32       |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

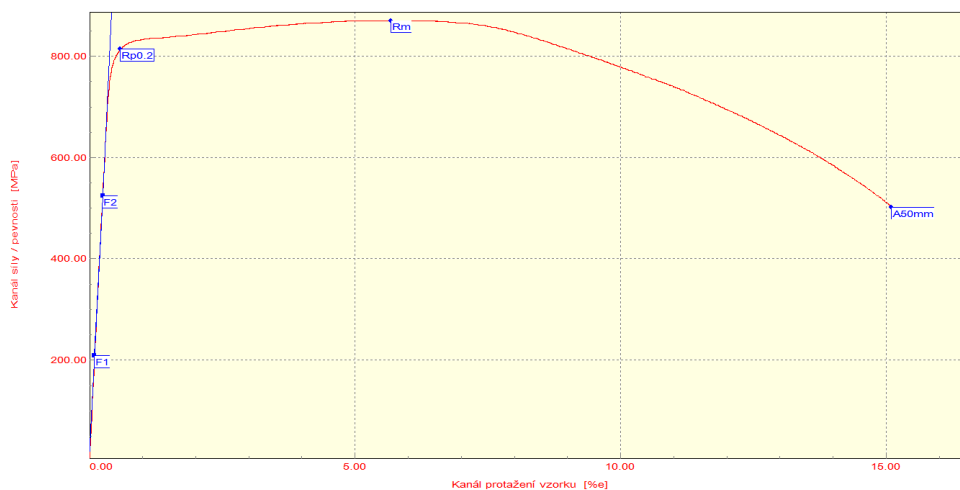
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S690QL  
Norma: : EN 10025-6  
Podmínky měření : -30°C  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------|--------------|-----------|------------|
| 1             | 813.5        | 870.4     | 14.86      |
| 2             | 817.4        | 885.8     | 14.35      |
| 3             | 814.7        | 870.4     | 14.08      |
| 4             | 811.3        | 867.5     | 14.57      |
| 5             | 818.8        | 888.8     | 14.89      |

| Statistická hodnota | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek       | 5            | 5         | 5          |
| Průměrná hodnota    | 815.1        | 876.6     | 14.55      |
| Směrodatná odchylka | 3.0          | 9.9       | 0.34       |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

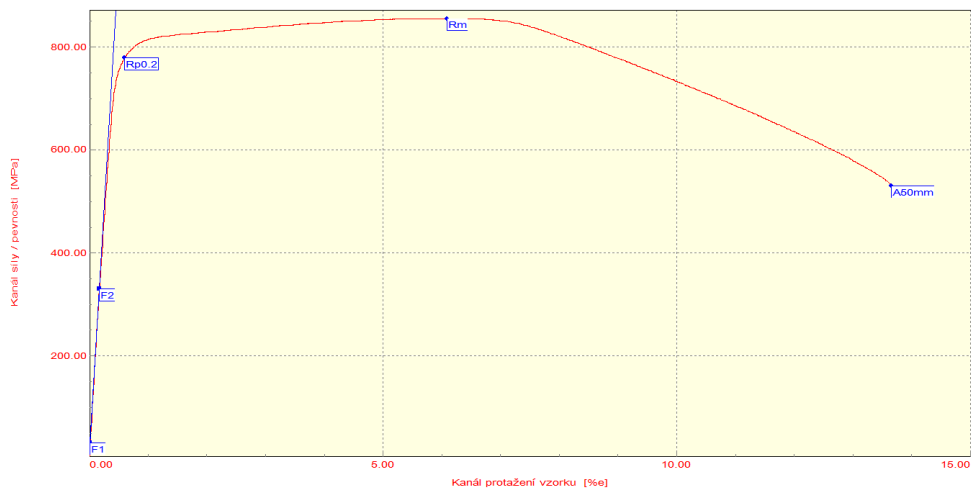
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S690QL  
Norma: : EN 10025-6  
Podmínky měření : 20°C  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------|--------------|-----------|------------|
| 1             | 779.2        | 855.4     | 13.38      |
| 2             | 765.3        | 860.6     | 14.23      |
| 3             | 777.2        | 854.7     | 14.56      |
| 4             | 768.3        | 870.6     | 13.97      |
| 5             | 770.2        | 845.8     | 13.52      |

| Statistická hodnota | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek       | 5            | 5         | 5          |
| Průměrná hodnota    | 772.0        | 857.4     | 13.93      |
| Směrodatná odchylka | 5.9          | 9.1       | 0.49       |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

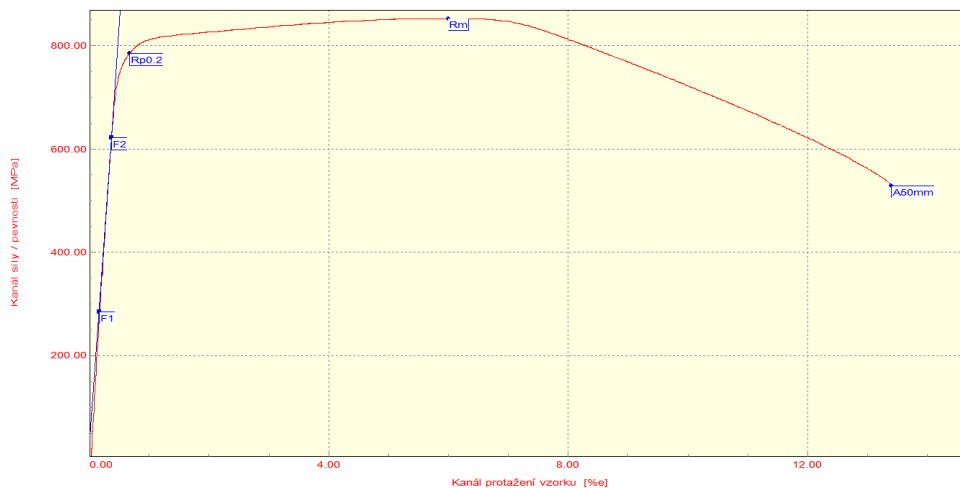
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S690QL  
Norma: : EN 10025-6  
Podmínky měření : 0°C  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------|--------------|-----------|------------|
| 1             | 785.0        | 852.6     | 13.09      |
| 2             | 777.8        | 870.6     | 13.82      |
| 3             | 778.2        | 847.8     | 13.72      |
| 4             | 779.2        | 847.8     | 13.35      |
| 5             | 779.4        | 870.6     | 13.43      |

| Statistická hodnota | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek       | 5            | 5         | 5          |
| Průměrná hodnota    | 779.9        | 857.9     | 13.48      |
| Směrodatná odchylka | 2.9          | 11.7      | 0.29       |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

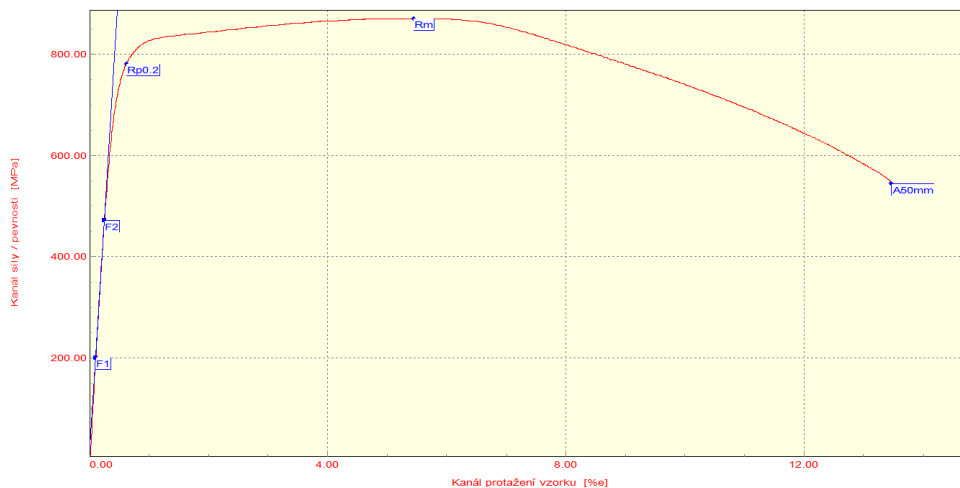
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S690QL  
Norma: : EN 10025-6  
Podmínky měření: : -15°C  
Směr odebrání vzorku: : 90°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------|-----------|--------|---------|
| 1             | 780.5     | 870.6  | 13.18   |
| 2             | 790.2     | 867.5  | 12.76   |
| 3             | 791.5     | 867.5  | 12.33   |
| 4             | 782.6     | 870.6  | 12.71   |
| 5             | 786.2     | 876.4  | 13.06   |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------------|-----------|--------|---------|
| Počet zkoušek       | 5         | 5      | 5       |
| Průměrná hodnota    | 788.2     | 866.5  | 12.81   |
| Směrodatná odchylka | 4.7       | 8.6    | 0.33    |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

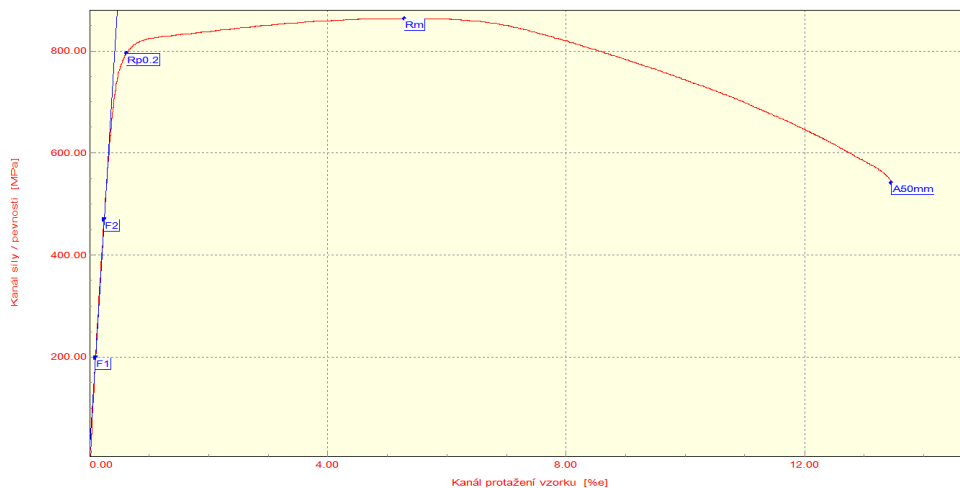
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S690QL  
Norma: : EN 10025-6  
Podmínky měření : -30°C  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------|-----------|--------|---------|
| 1             | 793.9     | 863.1  | 13.18   |
| 2             | 795.4     | 861.7  | 12.35   |
| 3             | 792.2     | 877.8  | 12.06   |
| 4             | 789.1     | 877.8  | 12.71   |
| 5             | 791.7     | 860.3  | 13.04   |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------------|-----------|--------|---------|
| Počet zkoušek       | 5         | 5      | 5       |
| Průměrná hodnota    | 792.5     | 868.2  | 12.67   |
| Směrodatná odchylka | 2.4       | 8.9    | 0.47    |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>





## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

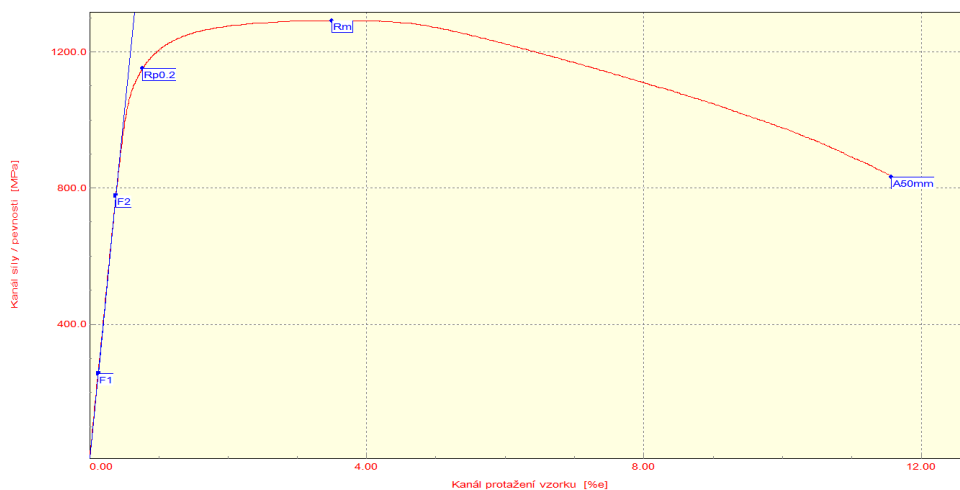
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : Dillidur 400 V  
Norma: : -  
Podmínky měření : 20°C  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------|-----------|--------|---------|
| 1             | 1161.3    | 1292.3 | 11.16   |
| 2             | 1136.8    | 1291.2 | 10.77   |
| 3             | 1164.7    | 1303.0 | 10.62   |
| 4             | 1140.3    | 1281.8 | 11.40   |
| 5             | 1149.4    | 1290.2 | 11.16   |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------------|-----------|--------|---------|
| Počet zkoušek       | 5         | 5      | 5       |
| Průměrná hodnota    | 1148.3    | 1291.7 | 11.02   |
| Směrodatná odchylka | 11.2      | 7.6    | 0.32    |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

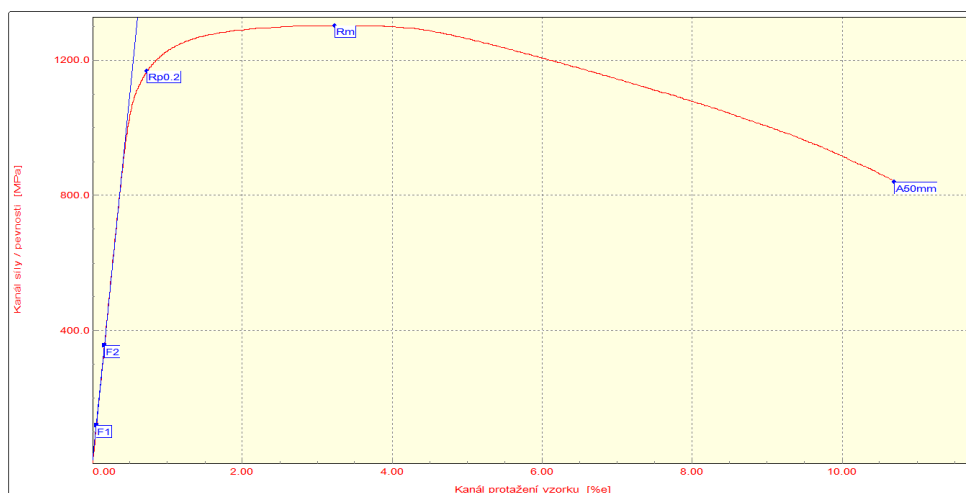
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : Dillidur 400 V  
Norma: : -  
Podmínky měření : 0°C  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------|--------------|-----------|------------|
| 1             | 1167.8       | 1303.0    | 10.32      |
| 2             | 1163.6       | 1303.0    | 10.94      |
| 3             | 1159.1       | 1290.2    | 9.94       |
| 4             | 1156.0       | 1294.5    | 10.90      |
| 5             | 1158.2       | 1292.3    | 10.32      |

| Statistická hodnota | Rp0.2<br>MPa | Rm<br>MPa | A50mm<br>% |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek       | 5            | 5         | 5          |
| Průměrná hodnota    | 1160.9       | 1296.6    | 10.48      |
| Směrodatná odchylka | 4.7          | 6.0       | 0.43       |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

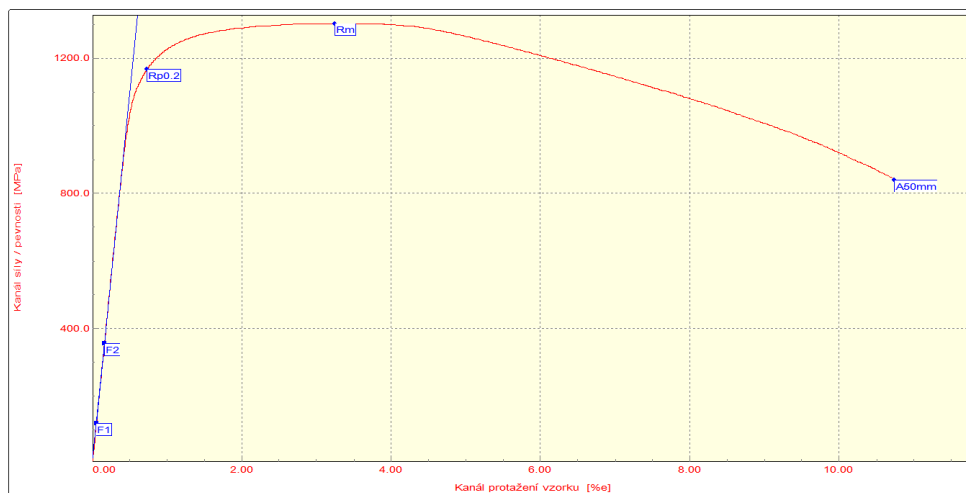
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : Dillidur 400 V  
Norma: : -  
Podmínky měření: : -15°C  
Směr odebrání vzorku: : 0°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------|-----------|--------|---------|
| 1             | 1167.6    | 1303.0 | 10.36   |
| 2             | 1166.6    | 1297.4 | 9.94    |
| 3             | 1160.1    | 1294.6 | 10.32   |
| 4             | 1167.3    | 1303.0 | 10.40   |
| 5             | 1167.3    | 1298.7 | 9.85    |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------------|-----------|--------|---------|
| Počet zkoušek       | 5         | 5      | 5       |
| Průměrná hodnota    | 1165.6    | 1299.3 | 10.17   |
| Směrodatná odchylka | 3.1       | 3.7    | 0.26    |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

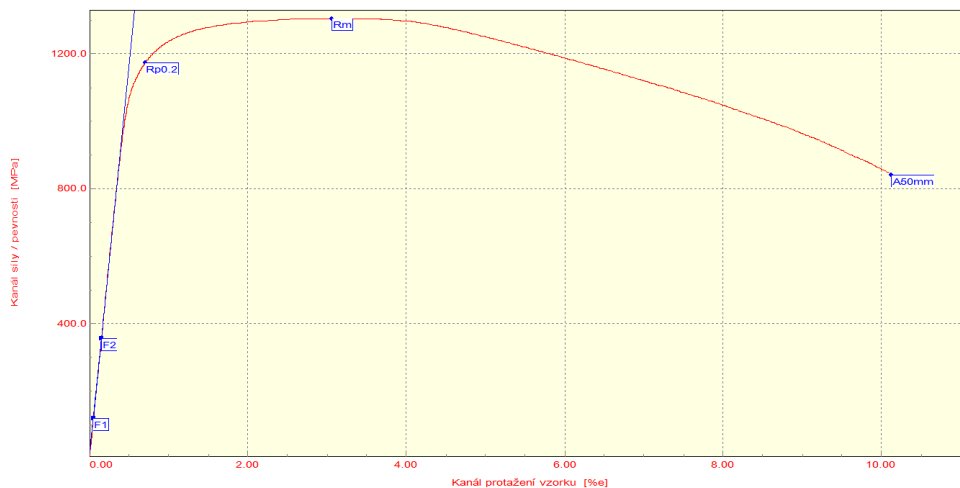
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : Dillidur 400 V  
Norma: : -  
Podmínky měření: : -30°C  
Směr odebrání vzorku: : 0°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------|-----------|--------|---------|
| 1             | 1174.1    | 1305.2 | 9.77    |
| 2             | 1178.4    | 1311.7 | 9.94    |
| 3             | 1179.9    | 1313.9 | 10.03   |
| 4             | 1167.2    | 1296.6 | 9.63    |
| 5             | 1178.5    | 1313.9 | 10.20   |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------------|-----------|--------|---------|
| Počet zkoušek       | 5         | 5      | 5       |
| Průměrná hodnota    | 1175.6    | 1308.2 | 9.92    |
| Směrodatná odchylka | 5.2       | 7.4    | 0.23    |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

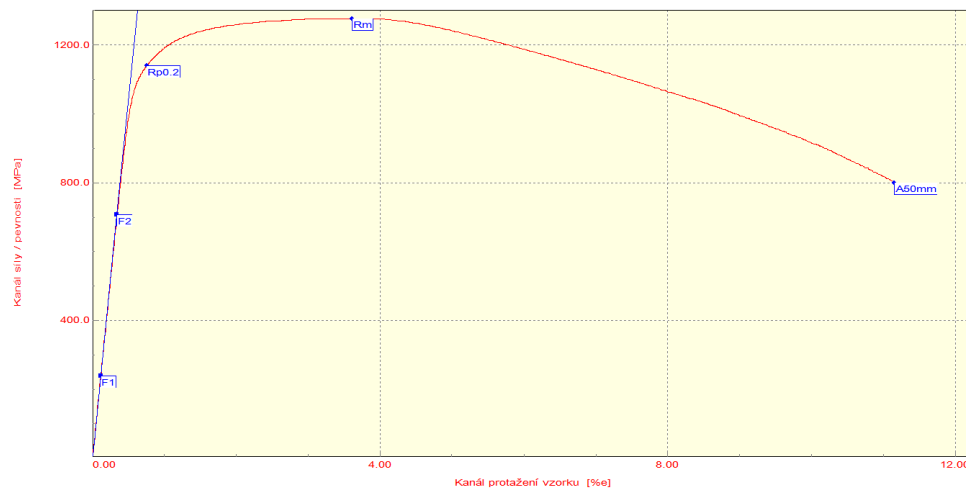
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : Dillidur 400 V  
Norma: : -  
Podmínky měření : 20°C  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------|-----------|--------|---------|
| 1             | 1139.4    | 1276.9 | 10.76   |
| 2             | 1156.3    | 1278.1 | 11.13   |
| 3             | 1130.7    | 1266.5 | 10.66   |
| 4             | 1165.4    | 1288.7 | 11.24   |
| 5             | 1151.7    | 1272.9 | 11.07   |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------------|-----------|--------|---------|
| Počet zkoušek       | 5         | 5      | 5       |
| Průměrná hodnota    | 1148.7    | 1276.6 | 10.97   |
| Směrodatná odchylka | 13.7      | 8.1    | 0.25    |



### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

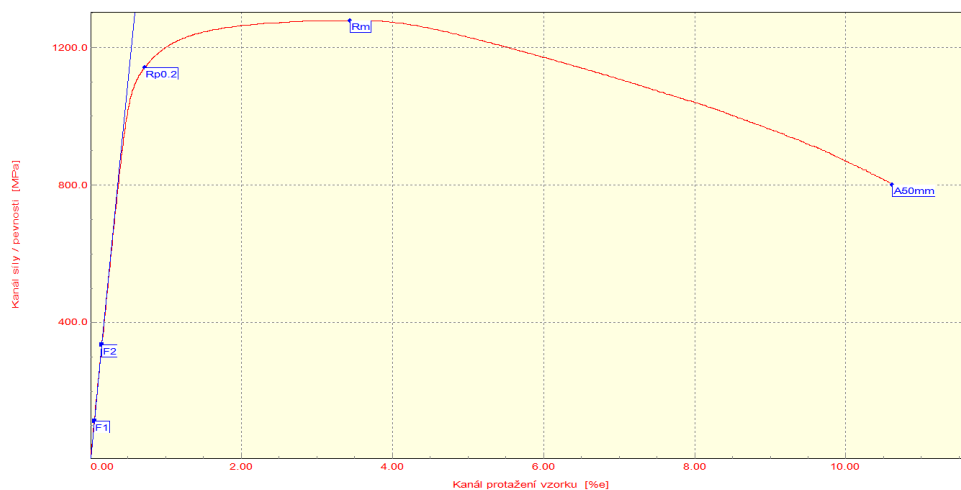
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : Dillidur 400 V  
Norma: : -  
Podmínky měření : 0°C  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------|-----------|--------|---------|
| 1             | 1141.6    | 1279.0 | 10.26   |
| 2             | 1172.6    | 1266.7 | 10.90   |
| 3             | 1141.9    | 1281.1 | 10.45   |
| 4             | 1169.5    | 1284.4 | 10.73   |
| 5             | 1151.8    | 1286.0 | 10.42   |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------------|-----------|--------|---------|
| Počet zkoušek       | 5         | 5      | 5       |
| Průměrná hodnota    | 1155.5    | 1283.8 | 10.55   |
| Směrodatná odchylka | 14.9      | 3.9    | 0.26    |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

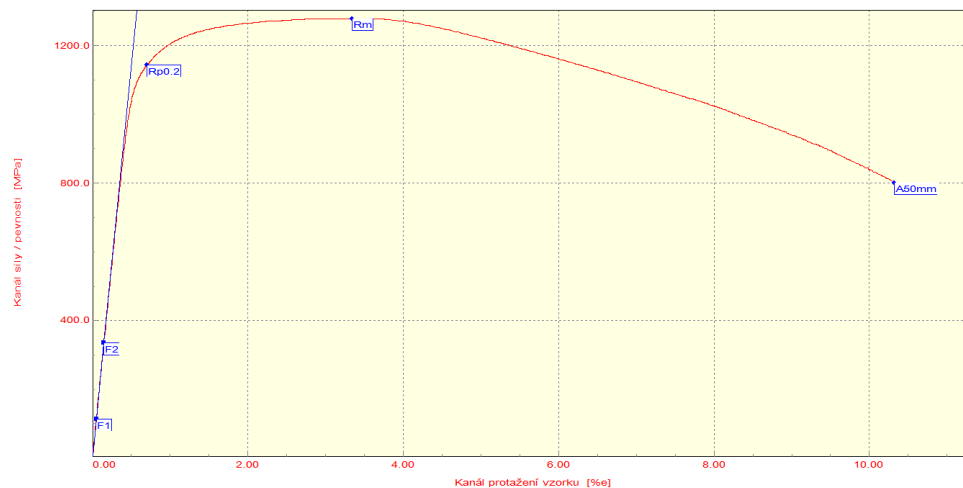
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : Dillidur 400 V  
Norma: : -  
Podmínky měření : -15°C  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------|-----------|--------|---------|
| 1             | 1143.2    | 1279.0 | 9.97    |
| 2             | 1162.3    | 1296.6 | 10.26   |
| 3             | 1164.9    | 1278.1 | 10.49   |
| 4             | 1150.8    | 1287.4 | 9.99    |
| 5             | 1183.3    | 1297.3 | 10.33   |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------------|-----------|--------|---------|
| Počet zkoušek       | 5         | 5      | 5       |
| Průměrná hodnota    | 1160.9    | 1287.7 | 10.21   |
| Směrodatná odchylka | 15.3      | 9.2    | 0.22    |



### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1

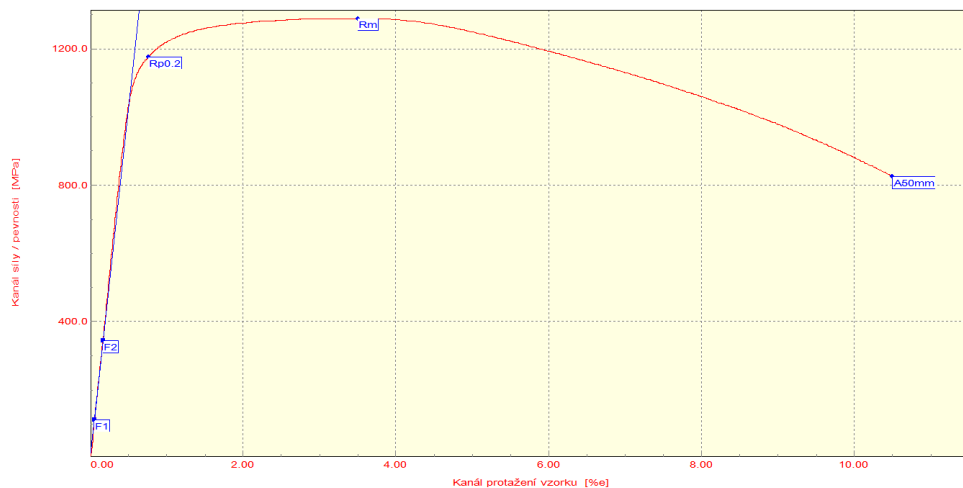
#### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : Dillidur 400 V  
Norma: : -  
Podmínky měření : -30°C  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 10 x 6 [mm]  
Vypracoval: : Aleš Emmerling  
Datum zkoušky: : 13.3. 2012

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------|-----------|--------|---------|
| 1             | 1176.6    | 1288.7 | 10.11   |
| 2             | 1172.3    | 1300.9 | 9.49    |
| 3             | 1163.7    | 1302.5 | 10.06   |
| 4             | 1170.8    | 1282.3 | 10.12   |
| 5             | 1167.3    | 1302.5 | 9.53    |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------------|-----------|--------|---------|
| Počet zkoušek       | 5         | 5      | 5       |
| Průměrná hodnota    | 1170.2    | 1295.4 | 9.86    |
| Směrodatná odchylka | 4.9       | 9.3    | 0.32    |



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>





## Příloha č. 2

Tabulka naměřených hodnot ze zkoušky tvrdosti dle Brinella

| Vzorek         | Teplota [°C] | Průměr [HB] | Vpich 1 [HB] | Vpich 2 [HB] | Vpich 3 [HB] | Vpich 4 [HB] | Vpich 5 [HB] |
|----------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Dillidur 400 V | 20           | 358         | 360          | 361          | 352          | 355          | 362          |
|                | 0            | 363         | 362          | 362          | 364          | 364          | 365          |
|                | -15          | 370         | 370          | 369          | 368          | 367          | 375          |
|                | -30          | 378         | 376          | 375          | 378          | 381          | 380          |
| S690 QL        | 20           | 261         | 261          | 262          | 259          | 261          | 260          |
|                | 0            | 262         | 261          | 262          | 261          | 263          | 263          |
|                | -15          | 263         | 266          | 262          | 263          | 262          | 263          |
|                | -30          | 269         | 268          | 269          | 267          | 270          | 269          |
| S355J2         | 20           | 172         | 172          | 171          | 170          | 173          | 172          |
|                | 0            | 173         | 174          | 174          | 172          | 173          | 172          |
|                | -15          | 176         | 177          | 175          | 175          | 177          | 176          |
|                | -30          | 179         | 179          | 178          | 180          | 179          | 180          |



### Příloha č. 3

Tabulka naměřených hodnot ze zkoušky vrubové houževnatosti

| Materiál:                       | Pořadové číslo měření | S355J2 |      | S690 QL |      | Dillidur 400 V |      |
|---------------------------------|-----------------------|--------|------|---------|------|----------------|------|
| Směr:                           |                       | 0°     | 90°  | 0°      | 90°  | 0°             | 90°  |
| <b>KU [J] při teplotě 20°C</b>  | 1.                    | 79     | 60   | 98      | 93   | 73             | 68   |
|                                 | 2.                    | 74     | 59   | 100     | 95   | 69             | 64   |
|                                 | 3.                    | 77     | 58   | 100     | 97   | 71             | 69   |
|                                 | 4.                    | 76     | 58   | 103     | 92   | 69             | 68   |
|                                 | 5.                    | 75     | 61   | 99      | 94   | 73             | 69   |
| <b>Průměr KU [J]:</b>           |                       | 76,2   | 59,2 | 100     | 94,2 | 71             | 67,6 |
| <b>KU [J] při teplotě 0°C</b>   | 1.                    | 64     | 54   | 99      | 90   | 65             | 61   |
|                                 | 2.                    | 69     | 55   | 98      | 90   | 63             | 63   |
|                                 | 3.                    | 69     | 54   | 98      | 89   | 67             | 63   |
|                                 | 4.                    | 64     | 50   | 100     | 99   | 61             | 55   |
|                                 | 5.                    | 69     | 50   | 99      | 99   | 64             | 56   |
| <b>Průměr KU [J]:</b>           |                       | 67     | 52,6 | 98,8    | 93,4 | 64             | 59,6 |
| <b>KU [J] při teplotě -15°C</b> | 1.                    | 64     | 49   | 98      | 89   | 53             | 58   |
|                                 | 2.                    | 63     | 45   | 93      | 93   | 57             | 51   |
|                                 | 3.                    | 59     | 50   | 96      | 90   | 51             | 50   |
|                                 | 4.                    | 59     | 44   | 100     | 91   | 56             | 53   |
|                                 | 5.                    | 62     | 46   | 92      | 87   | 55             | 55   |
| <b>Průměr KU [J]:</b>           |                       | 61,4   | 46,8 | 95,8    | 90   | 54,4           | 53,4 |
| <b>KU [J] při teplotě -30°C</b> | 1.                    | 53     | 45   | 96      | 84   | 53             | 44   |
|                                 | 2.                    | 56     | 48   | 97      | 86   | 51             | 42   |
|                                 | 3.                    | 51     | 43   | 92      | 91   | 52             | 48   |
|                                 | 4.                    | 57     | 44   | 97      | 84   | 47             | 44   |
|                                 | 5.                    | 54     | 44   | 90      | 97   | 54             | 47   |
| <b>Průměr KU [J]:</b>           |                       | 54,2   | 44,8 | 94,4    | 88,4 | 51,4           | 45   |

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 25. května 2012

Podpis

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with head of the thesis and a consultant.

Date: 25. May 2012

Signature